



Diego Aquino Nogueira

Licenciado em Engenharia Civil

Caracterização de Argamassas Romanas do Sítio Arqueológico do Creiro, Arrábida

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Reabilitação de Edifícios

Orientador: Professora Doutora Paulina Faria, Professora Associada da Faculdade
de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa

Co-orientador: Doutor António Santos Silva, Investigador Auxiliar, Laboratório
Nacional de Engenharia Civil

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Fernando M. A.
Henriques

Arguente: Prof. Doutor Luís Baltazar

Vogal: Prof. Doutora Paulina Faria

Maio 2021



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Caracterização de Argamassas Romanas do Sítio Arqueológico do Creiro, Arrábida

Copyright © Diego Aquino Nogueira, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Finalizada mais uma etapa de minha vida acadêmica, gostaria de expressar a minha gratidão a todas as pessoas que estiveram ao meu lado diariamente na universidade e as pessoas que torceram pelo meu sucesso mesmo distante.

Início os agradecimentos pelos meus orientadores, Professora Doutora Paulina Faria e Doutor António Santos Silva pela paciência, pela transmissão de conhecimento e pela disponibilidade.

Ao Engenheiro Vítor Silva pelo acompanhamento durante a campanha experimental de caracterização física e mecânica, e também durante a campanha experimental in situ. A Ingrid Firmino pelo apoio e ajuda na campanha experimental de caracterização física e mecânica, e também durante a campanha experimental in situ.

Agradeço a todo o Departamento dos Matérias – Núcleo de Materiais Metálicos, do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), por todo o acompanhamento na realização da campanha experimental de caracterização química e mineralógica, e em especial a Luís Almeida e Dora Soares.

Agradeço ao Professor Doutor José Mirão pelo acompanhamento durante os ensaios de difração de raio X no Laboratório Hercules da Universidade de Évora.

A todos os colegas de curso que me acompanharam e me apoiaram durante estes dois anos, em especial Adriana Ambrósio, Rafael Silva e Thiago Rosendo.

Agradeço ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano (IF Baiano) por viabilizar e financiar a realização deste curso, especialmente a chefe da Coordenação de Engenharia a Eng^a. Isnaia Aragão.

Agradecimento muito especial a minha esposa Caroline Souza, pela paciência, incentivo e apoio incondicional. A lizete Bisneta que me alegrou todos os dias. A minha mãe Clélia Aquino e meu padrasto Conor O’Sullivan pelas visitas recorrentes que recarregavam as minhas energias e matava a saudade.

Também a todos amigos e familiares que puderam me visitar neste curto espaço de tempo morando fora do Brasil, meu muito obrigado.

Com o objetivo de conservar o património arquitetónico, tem se realizado intervenções nestas edificações. Mas, nem sempre, estas intervenções têm-se mostrado eficientes, no sentido de preservar toda originalidade da edificação. Para realizar intervenções eficientes é necessário assegurar compatibilidade entre os materiais, para isso, também é necessário obter informações sobre as características dos materiais.

O sítio arqueológico do Creiro, construído provavelmente entre o século I a.C. e o século V d.C., está localizado na Serra da Arrábida, Setúbal, e é um património edificado. Neste procedeu-se uma inspeção visual do sítio arqueológico, com a realização de ensaios não destrutivos in situ e recolha de amostras de reboco e amostras de betão Romano para ensaios laboratoriais de caracterização física, mecânica, química e mineralógica.

São descritos e identificados locais onde ocorreu a recolha de amostras e os locais onde foram realizados os ensaios in situ. Apresenta-se a metodologia e procedimentos experimentais utilizados neste estudo, e apresenta-se os resultados da campanha experimental, juntamente com discussão destes resultados.

Os resultados revelam diferentes tipos de materiais na construção do sítio arqueológico do Creiro, principalmente com argamassas à base de cal aérea com diferentes traços. Os resultados dos ensaios in situ indicam boas características de resistência mecânica superficial. Os ensaios físico-mecânicos indicaram elevados valores de resistências superficiais, e comportamentos distintos em contato com água. Os ensaios químicos e mineralógicos indicam que os materiais constituintes possuem dosagens de ligante variáveis entre os locais estudados.

Os resultados que foram obtidos e a sua análise possibilitou avaliar a constituição dos materiais e as características gerais. Considera-se ter contribuído para suportar futuras intervenções.

With the aim of preserving the architectural heritage, interventions have been made in these buildings. But, not always, these interventions have been efficient, in the sense of preserving all the originality of the building. To carry out efficient interventions it is necessary to ensure compatibility between the materials, for this, it is also necessary to obtain information on the characteristics of the materials.

The archaeological site of Creiro was probably built between the 1st century BC and the 5th century AD, it is in Serra da Arrábida, Setúbal, and is a built heritage. A visual inspection of the archaeological site was carried out, with non-destructive tests in situ and the collection of plaster and Roman concrete samples for laboratory tests of physical, mechanical, chemical, and mineralogical characterization.

The places where samples were taken and the place where in situ tests were performed are described. The methodology and experimental procedures used in this study are presented, as well as the results of the experimental campaign.

The results reveal different types of materials in the construction of the Creiro archaeological site, mainly with aerial lime mortars with different traces. The results of in situ tests indicate good characteristics of surface mechanical resistance. The physical-mechanical tests indicated high values of surface resistance, and distinct behavior in contact with water. The chemical and mineralogical tests indicate that the constituent materials have variable binder dosages between the studied sites.

The use of materials of diverse composition was verified, the results that were obtained and their analysis made it possible to evaluate the constitution of the materials and the general characteristics. It is considered to have contributed to support future interventions.

Keywords: archaeological site Creiro, lime, mortar, characterization

Índice geral	ix
Índice de Figuras	xiii
Índice de Tabelas	xvii
1. Introdução	1
1.1 Enquadramento de tema	1
1.2 Objetivos e metodologia	1
1.3 Estrutura e organização da dissertação	2
2. Argamassas históricas.....	3
2.1 Considerações gerais.....	3
2.2 Composição de argamassas históricas	4
2.2.1 Ligantes	4
2.2.2 Agregados.....	6
2.2.3 Adições e adjuvantes	7
2.3 Caracterização de argamassas antigas.....	7
3. Descrição do sítio arqueológico do Creiro; Arrábida	15
4. Campanha Experimental	21
4.1 Campanha experimental <i>in situ</i>	21
4.1.1 Mapeamento	21
4.1.2 Impacto por choque de esfera.....	22
4.1.3 Resistência superficial por esclerómetro pendular	22
4.1.4 Resistência superficial por durómetro	24
4.1.5 Absorção de água sob pressão por tubos de Karsten	24
4.2 Recolha das amostras.....	25
4.3 Campanha experimental dos ensaios físicos e mecânicos em laboratório	26
4.3.1 Preparação das amostras de argamassas e betões romanos	26
4.3.2 Resistência superficial por durómetro	28
4.3.3 Massa volúmica	29
4.3.4 Porosidade aberta, massa volúmica aparente e massa volúmica real.....	30

4.3.5 Módulo de elasticidade dinâmico.....	31
4.3.6 Velocidade de propagação de ultrassons.....	32
4.3.7 Absorção de água por capilaridade	33
4.3.8 Secagem.....	34
4.3.9 Resistência à compressão	35
4.3.10 Tipo e máxima dimensão dos agregados	36
4.4 Campanha experimental dos ensaios químicos e mineralógicos em laboratório	36
4.4.1 Preparação das amostras	36
4.4.2 Análise mineralógica por difração de raios X (DRX).....	38
4.4.3 Análise termogravimétrica e térmica diferencial (ATG/dTG/ATD).....	39
4.4.4 Determinação de resíduo insolúvel por ataque ácido (RI)	40
4.4.5 Análise granulométrica do agregado após ataque ácido	42
5. Resultados e discussão.....	45
5.1 Considerações gerais.....	45
5.2 Resultado da caracterização in situ.....	45
5.2.1 Impacto por choque de esfera.....	45
5.2.2 Resistência superficial por esclerómetro pendular	46
5.2.3 Resistência superficial por durômetro	47
5.2.4 Absorção de água sob pressão por tubos de Karsten	48
5.3 Resultados dos ensaios físicos-mecânicos realizados em laboratório.....	48
5.3.1 Resistência superficial por durômetro	48
5.3.2 Massa volúmica	50
5.3.3 Porosidade aberta, massa volúmica aparente e massa volúmica real.....	50
5.3.4 Módulo de elasticidade dinâmico.....	52
5.3.5 Velocidade de propagação de ultrassons.....	53
5.3.6 Absorção de água por capilaridade	54
5.3.7 Secagem.....	59
5.3.8 Resistência a compressão	64
5.4 Resultados dos ensaios químicos e mineralógicos.....	65

5.4.1 Determinação de resíduo insolúvel por ataque ácido (RI)	65
5.4.2 Análise granulométrica do agregado após ataque ácido	66
5.4.3 Análise mineralógica por difração de raios X (DRX)	68
5.4.4 Análise termogravimétrica e térmica diferencial (ATG/dTG/ATD)	70
6. Conclusões	79
6.1 Considerações finais	79
6.2 Desenvolvimentos futuros	80
Referências	81
Anexos	85

Figura 2.1. Ciclo da cal	6
Figura 3.1. Localização do sítio arqueológico do Creiro.....	15
Figura 3.2. Esboço da Carta dos arredores de Setúbal	16
Figura 3.3. Fábrica G12.....	16
Figura 3.4. Planta mais detalhada Oficina F14	17
Figura 3.5. Planta mais detalhada do Edifício H	18
Figura 3.6. Planta mais detalhada da Oficina K10	19
Figura 3.7. Planta mais detalhada do Balneário	19
Figura 4.1. Localização dos ensaios realizados in situ	22
Figura 4.2. Ensaio de impacto de esfera com o aparelho <i>Martinet-Baronnie</i> (a) ensaio com esclerómetro pendular (b).....	23
Figura 4.3. Ensaio de dureza superficial com durómetro Shore A (a) ensaio de absorção de água com tubos de Karsten (b).....	24
Figura 4.4. Local de recolha das amostras.....	25
Figura 4.5. Corte para preparação das amostras de betão.....	27
Figura 4.6. Ensaio de resistência superficial com durómetro em amostra de betão Romano.....	29
Figura 4.7. Pesagem (a) e medição das dimensões (b) dos provetes cúbicos.....	29
Figura 4.8. Exsicador ligado à bomba de vácuo (a), amostras imersas em água (b) e pesagem hidrostática (c).....	30
Figura 4.9. Ensaio módulo de elasticidade por frequência no aparelho Zeus Resonance Meter.....	31
Figura 4.10. Aparelho Pundit Lab (Proceq) (a) e amostra em ensaio(b).....	32
Figura 4.11. Tabuleiro com provetes sobre rede e em contacto com a lâmina de água (a) e pesagem do provete (b).....	33
Figura 4.12. Provetes durante ensaio de secagem.....	35
Figura 4.13. Provetes de reboco com argamassa de confinamento (a) e equipamento ZWICK Z050 em ensaio de compressão (b).....	36
Figura 4.14. Martelo de plástico e borracha (a), peneiro com abertura de malha de 106 µm e almofariz (b).....	37
Figura 4.15. Porta-amostras preenchidas (a) Equipamento D8 Discover (b).....	38
Figura 4.16. Equipamento SETARAM TGA 92.....	40
Figuras 4.17. Exsicador com amostras (a), copos tapados com amostras (b), agitação magnética (c), indicador de pH (d), funil com filtro de papel e frascos plásticos (e) e mufla a 1000°C (f).....	41
Figura 4.18. Ataque ácido (a), filtragem do resíduo usando cadinhos de Gooch com recurso a uma bomba de vácuo (b) e peneiros da série ASTM em agitador (c).....	43

Figura 5.1. Valores da resistência superficial por esclerômetro obtidos nos rebocos da cisterna norte, tanque da oficina F14 lados poente e sul, frigidarium lados poente e sul.....	46
Figura 5.2. Valor da resistência superficial por durômetro obtidos no reboco da cisterna lados norte e sul, entrada da construção circular, tanque da Oficina 14 e frigidarium lados poente e sul.....	47
Figura 5.3. Valores de resistência superficial por durômetro dos rebocos.....	49
Figura 5.4. Valores da resistência superficial por durômetro dos betões.....	49
Figura 5.5. Valores de massa volúmica pelo método geométrico dos provetes cúbicos.....	50
Figura 5.6. Valores de porosidade aberta.....	51
Figura 5.7. Valores de massa volúmica aparente.....	51
Figura 5.8. Valores de massa volúmica real.....	52
Figura 5.9. Valores do módulo de elasticidade dinâmico.	53
Figura 5.10. Valores de velocidade de propagação de ultrassons.....	54
Figura 5.11. Curva de absorção de água por capilaridade de provetes de reboco retirados da cisterna.....	55
Figura 5.12. Curva de absorção de água por capilaridade de provetes retirados do suporte do reboco da cisterna.....	55
Figura 5.13. Curva de absorção de água por capilaridade de provetes de reboco retirados da camada de base da construção circular, oficina K10 e local não identificado.....	56
Figura 5.14. Curva de absorção de água por capilaridade em provetes de betão retirados do depósito de água.....	57
Figura 5.15. Curva de absorção de água por capilaridade em provetes de betão retirados do balneário amostra 9.....	57
Figura 5.16. Curva de absorção de água por capilaridade em provetes de betão retirados do balneário amostras 13 e 14.....	58
Figura 5.17. Curvas de secagem em função do tempo a partir das quais se determina a taxa na primeira fase de secagem (TS1), provetes de reboco da cisterna, suporte da cisterna, oficina K10 e camada de base da construção circular.....	60
Figura 5.18. Curvas de secagem em função do tempo a partir das quais se determina a taxa na primeira fase de secagem (TS2), provetes de reboco da cisterna, suporte da cisterna, oficina K10 e camada de base da construção circular.....	60
Figura 5.19. Curvas de secagem em função do tempo a partir das quais se determina a taxa na primeira fase de secagem (TS1), provetes de betão do depósito de água e do balneário amostra 9.....	61
Figura 5.20. Curvas de secagem em função do tempo a partir das quais se determina a taxa na segunda fase de secagem (TS1), provetes de betão do balneário amostras 13 e 14.....	62
Figura 5.21. Curvas de secagem em função do tempo a partir das quais se determina a taxa na segunda fase de secagem (TS2), provetes de betão do depósito de água e do balneário amostra 9.....	62

Figura 5.22. Curvas de secagem em função do tempo a partir das quais se determina a taxa na segunda fase de secagem (TS2), provetes de betão do balneário amostras 13 e 14.....	63
Figura 5.23. Curvas granulométricas do agregado de provetes de reboco.....	67
Figura 5.24. Curvas granulométricas do agregado de provetes de betão.....	67
Figura 5.25. Registos ATG/DTG/ATD do provete RC 1.....	70
Figura 5.26. Registos ATG/DTG/ATD do provete RC 2.....	71
Figura 5.27. Registos ATG/DTG/ATD do provete SC 2.....	71
Figura 5.28. Registos ATG/DTG/ATD do provete BDA 3.....	72
Figura 5.29. Registos ATG/DTG/ATD do provete RDA 4.....	72
Figura 5.30. Registos ATG/DTG/ATD do provete RTL 5.....	73
Figura 5.31. Registos ATG/DTG/ATD do provete ROK 6.....	73
Figura 5.32. Registos ATG/DTG/ATD do provete RNI 7.1B.....	74
Figura 5.33. Registos ATG/DTG/ATD do provete RNI 7.1C.....	74
Figura 5.34. Registos ATG/DTG/ATD do provete RNI 7.2.....	75
Figura 5.35. Registos ATG/DTG/ATD do provete RT 8.....	75
Figura 5.36. Registos ATG/DTG/ATD do provete BB 9.....	76
Figura 5.37. Registos ATG/DTG/ATD do provete CBRC 11.....	76
Figura 5.38. Registos ATG/DTG/ATD do provete CBRC 12.....	77
Figura 5.39. Registos ATG/DTG/ATD do provete BB 13.....	77
Figura 5.40. Registos ATG/DTG/ATD do provete BB 14.....	78

Tabela 2.1. Estudos em Kyme (Turquia), Mértola e Tróia (Portugal).....	09
Tabela 2.2. Estudos em Lisboa, Conímbriga e Beja (Portugal).....	10
Tabela 2.3. Estudos em Portalegra, Albufeira, Lisboa e Coimbra (Portugal).....	11
Tabela 4.1. Ensaaios <i>in situ</i> realizados e sua localização no sítio do Creiro.....	21
Tabela 4.2. Classificação da resistência superficial.....	23
Tabela 4.3. Nomenclatura das amostras.	26
Tabela 4.4. Identificação dos provetes	27
Tabela 4.5. Provetes escolhidos para massa volúmica pelo método geométrico	30
Tabela 4.6. Série ASTM de peneiros utilizados para a separação granulométrica.....	42
Tabela 5.1. Tipos de ensaios, localização e números de ensaios.....	45
Tabela 5.2. Valores individuais e médios do coeficiente de capilaridade obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade.....	56
Tabela 5.3. Valores individuais e médios do coeficiente de capilaridade obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade dos betões.....	59
Tabela 5.4. Valores individuais e médios da taxa de secagem dos rebocos.....	61
Tabela 5.5. Valores individuais e médios da taxa de secagem dos betões.....	63
Tabela 5.6. Resultado da resistência a compressão.....	64
Tabela 5.7. Teor de resíduo insolúvel em ácido em betões.....	65
Tabela 5.8. Teor de resíduo insolúvel em ácido em rebocos.....	66
Tabela 5.9. Perdas de massa (%) em diferentes gamas de temperatura dos provetes.....	79

1. Introdução

1.1 Enquadramento de tema

Os revestimentos e acabamentos de elementos de construção dos edifícios têm uma importante função a desempenhar, já que constituem o envelope exterior, mais exposto às intempéries, que assegura a proteção desses elementos, em relação às ações agressivas da natureza. Os rebocos de argamassas de ligantes minerais são um dos principais componentes de proteção das construções, utilizados desde há milênios.

Em Portugal Continental, principalmente em obras de reabilitação de edifícios, mas também em construções de obras novas, públicas ou privadas (por exemplo na execução de subsolos para garagem), têm sido encontrados e documentados diversas construções históricas, muitas delas datadas do período de dominação Romana.

Por vezes tem sido possível a recolha de amostras de argamassas de assentamento de alvenarias e de rebocos desse período. Trata-se de argamassas muito duráveis, visto que chegaram aos dias atuais muitas delas em boas condições, após mais de dois mil anos de aplicadas e, por vezes, em condições agressivas, como os casos em que estiveram enterradas.

Sendo assim, é de suma importância que haja uma caracterização dessas argamassas históricas, tão antigas e duráveis, em especial as suas características físico-mecânicas e químicas, para, por um lado, se conhecer melhor a sua constituição, origem das matérias primas, sua preparação e aplicação, com objetivo de poderem ser desenvolvidas argamassas igualmente duráveis, por outro lado, para que quando partes dessas construções arqueológicas se encontram expostas ou visitáveis, possam ser reparadas com argamassas de substituição ou reparação compatíveis e adequadas.

1.2 Objetivos e metodologia

O objetivo principal dessa dissertação consiste, em contribuir para aumentar o conhecimento sobre argamassas arqueológicas, especificamente Romanas e da região de Setúbal.

Para elaboração dos objetivos propostos, esta dissertação irá seguir a metodologia a seguir:

- Levantamento bibliográfico relativo a características históricas, físicas, mecânicas, químicas e mineralógicas de argamassas históricas do período Romano, situadas em Portugal.
- Localização de casos de estudo do período Romano, escolha de um caso e realização de ensaios in situ.
- Recolha, identificação e preparação das amostras para ensaios de caracterização.
- Caracterização físico-mecânica e químico-mineralógica das amostras.
- Discussão dos resultados obtidos na campanha experimental, comparando diversos locais e relacionando propriedades obtidas, traçando paralelismo com os dados bibliográficos de estudos anteriores.

1.3 Estrutura e organização da dissertação

Esta dissertação está dividida em seis capítulos, acrescidos das referências bibliográficas e anexos. No primeiro capítulo está apresentado o enquadramento do tema, objetivos, metodologia e estrutura da dissertação.

No segundo capítulo está apresentado o estado de conhecimento relativo a argamassas históricas, apresentando considerações gerais, composições e caracterização de argamassas históricas, nomeadamente Romanas.

No terceiro capítulo está apresentado a descrição do caso de estudo, sua localização, provável período de construção e características da construção.

No quarto capítulo está apresentada a campanha experimental, descrevendo os procedimentos de ensaios realizados in situ e dos ensaios realizados em laboratório (ensaio físicos, mecânicos, químicos e mineralógicos).

No quinto capítulo estão apresentados os resultados dos ensaios realizados in situ e em laboratório às amostras, discutindo-os por comparação entre si e também com resultados de outros estudos.

No sexto capítulo estão apresentadas as conclusões que foram obtidas nessa dissertação e são apresentadas sugestões para estudos futuros dentro desta temática abordada.

Nos anexos apresentam-se, detalhadamente, os resultados individuais dos diferentes tipos de ensaios realizados.

2. Argamassas históricas

2.1 Considerações gerais

As argamassas têm vindo a ser utilizadas desde alguns milénios antes de Cristo até à atualidade. Em construções históricas observa-se a sua aplicação como suporte estrutural de alvenarias, reboco exterior e reboco interior de paredes de edifícios, como suporte de pintura mural, na regularização de pavimentos ou como argamassa de colagem de azulejos (Falcão, 2010).

A cal é um dos materiais mais antigos utilizados na construção. As primeiras utilizações de argamassas de cal são datadas desde a descoberta do fogo no Paleolítico. No Neolítico, por volta de 6.000 a.C., em Çatal Huyuk na Turquia, registaram-se as primeiras aplicações de cal aérea hidratada (hidróxido de cálcio – Ca(OH)_2 – produto da extinção/hidratação da cal viva – CaO). Um dos testemunhos mais antigos que ficou da utilização são os rebocos das pirâmides egípcias (Boyton, 1980, citado por Margalha, 2011).

No início da utilização de argamassas com cal, foi misturada com terra (Faria, 2018); depois foi misturada com areia; mais tarde foi-lhe adicionada a pedra de Santorini moída, que é uma pozolana (composto rico em sílica e alumina amorfas), constituindo assim um ligante hidráulico que apresenta como principal característica o facto de ganhar presa mesmo debaixo de água (Margalha, 2011) ou com pouco contato com o dióxido de carbono (CO_2) do ar.

Com os gregos (séc. VII a.C. a séc II a.C.) chegam as primeiras misturas de cal e areia na formulação de argamassas de revestimento, preocupados com o desenvolvimento das técnicas e materiais até aí utilizados, fazendo face à sua ideologia de arquitetura e de obras grandiosas (Papayianni et al., 2007). Anteriormente existiam já argamassas de terra ou de terra misturada com cal e com sulfato de cálcio hemi-hidratado, obtido por calcinação a temperatura muito inferior à da cal (Faria, 2018)

As argamassas de terra foram utilizadas desde os primórdios da humanidade, resultando da mistura de água com terra argilosa. A exemplo de uma argamassa para reboco, a terra é previamente peneirada para remoção das partículas de grande dimensão; caso a argamassa seja para assentamento de alvenaria pode conter partículas maiores. A terra peneirada é formada por areia, argila e silte. Se a quantidade de areia for baixa em relação à quantidade de argila é necessário adicionar mais areia ou fibras no momento da amassadura com água, para que o reboco de terra não venha a fissurar. As argamassas de terra endurecem por secagem da água, ficando assim, vulneráveis a ação da própria água (Faria e Lima, 2018).

Contudo, na Grécia a utilização da cal foi algo limitada, por se privilegiar o princípio coluna-lintel, sem utilização de argamassa na união de blocos de pedra e também pela utilização de terra argilosa em detrimento da cal como argamassa de assentamento das alvenarias (Alarcão, 1978, citado por Margalha, 2011).

Por sua vez, o povo Etrusco deixou vestígios da utilização de cal nas alvenarias de cisternas e túmulos (Margalha, 2011). No entanto, foram os Romanos (estabelecidos em Portugal entre os séculos III a.C. e VI d.C.) que, encarnando o mesmo espírito de grandiosidade do povo Grego, ao empreenderem grandes

construções naquele que viria a tornar-se um vasto império – constituído por aquedutos, basílicas, imponentes anfiteatros, entre outros – tornaram a ter como principal foco o desenvolvimento de novas técnicas e a aplicação mais eficaz das argamassas. Foi no período do Império Romano que mais se escreveu sobre as técnicas mais brilhantes de formulação, otimização e aplicação de argamassas. Infelizmente, no período Medieval perderam-se algumas dessas técnicas (Margalha, 2011).

2.2 Composição de argamassas históricas

A composição de uma argamassa é a mistura de pelo menos três materiais: o ligante, o agregado e a água. Como já referido anteriormente, podem-se adicionar outros elementos nas argamassas, que irão favorecer determinadas características: por exemplo, as adições pozolânicas, e os adjuvantes.

2.2.1 Ligantes

Os ligantes, como o próprio nome já diz, têm a função de ligar ou aglomerar todos os materiais presentes na mistura para fazer a argamassa.

Os ligantes podem ser divididos em três categorias: hidráulicos, aéreos e orgânicos (Veiga e Faria, 1990). Os ligantes hidráulicos são formados por um pó que, misturado com a água, inicia uma reação química, formando uma pasta que, após passado um determinado tempo ficará endurecida. Além de endurecer em contato com o ar, podem endurecer e atingir as mesmas características imerso em água. Os ligantes aéreos dependem do CO_2 da atmosfera para os transformar em carbonatos, portanto não podem endurecer imersos em água. Os ligantes orgânicos incluem as resinas sintéticas e hidrocarbonetos (Sousa Coutinho, 1988, citado por Faria Rodrigues, 2004). Os ligantes orgânicos não serão abordados neste trabalho.

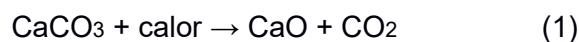
Este trabalho centra-se nas argamassas de cal, que tiveram uma ampla utilização e distribuição na construção de edifícios históricos no período Romano (Adam, 1989, citado por Almeida, 2015).

A cal aérea é obtida a partir da cozedura de pedra calcária com teor de impurezas inferior a 5%. A cal aérea é constituída principalmente por óxido de cálcio (CaO), na forma de cal viva, ou hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), na forma de cal hidratada, neste caso endurecendo lentamente ao ar por reação com o dióxido de carbono atmosférico (IPQ, 2011).

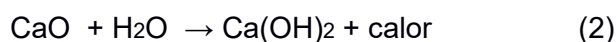
As cals vivas são cals aéreas formadas de óxido de cálcio ou magnésio (IPQ, 2011). As cals vivas são produzidas por calcinação da rocha calcária (ou da rocha dolomítica).

A cal viva calcítica obtém-se através da cozedura de pedra calcária a uma temperatura situando-se normalmente nos 900°C (Margalha, 2011).

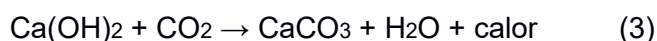
A equação 1 representa a transformação do carbonato de cálcio (CaCO_3) em óxido de cálcio (CaO) com libertação de dióxido de carbono (CO_2), por calcinação, obtido da rocha calcária (Sousa Coutinho, 1988, citado por Faria Rodrigues, 2004).



Depois de obtida a cal viva, procede-se à sua hidratação, apagamento ou extinção por adição de água. Verifica-se uma reação exotérmica com a libertação de grandes quantidades de calor. O processo de extinção da cal viva, na equação 2, consiste na transformação do óxido de cálcio (CaO) em hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 , que vulgarmente se designa por cal apagada, cal hidratada ou somente cal (Sousa Coutinho, 1988, citado por Faria Rodrigues, 2004).



Caso a quantidade de água seja muita, a cal transformar-se em pasta; se a quantidade de água for pouca, irá transformar-se em um pó fino (Faria et al., 2008). A partir deste ponto o Ca(OH)_2 pode ser misturado com água e areia, formando uma argamassa fresca. Conforme a equação 3, a argamassa de cal aérea, em contacto com o CO_2 do ar endurece lentamente transformando-se novamente em carbonato de cálcio (CaCO_3) (Sousa Coutinho, 1988, citado por Faria Rodrigues, 2004).



O processo de carbonatação, pode ser considerado como um processo dividido em fases. No primeiro momento acontece a difusão do CO_2 seguido da cristalização do CaCO_3 . As criações dos cristais de carbonato de cálcio modificam a estrutura porosa da argamassa e suas propriedades higroscópicas. Da evaporação da água de amassadura e formação dos carbonatos, resulta a formação de poros na pasta de cal aérea. Sendo assim, a velocidade de carbonatação traz consequências nas propriedades mecânicas da argamassa, nomeadamente resistência e durabilidade (Van Balen, 1994, citado por Almeida, 2015).

Todo este processo traduz o ciclo da cal, representado na Figura 2.1.

Uma outra alternativa para a produção de uma argamassa de cal é a produção pelo método da “cal a quente”, em que são misturados pedaços de CaO em pedra diretamente com areia (ou terra) molhada, hidratando em contato com a água presente na areia (Parracha et al., 2020). Neste processo é provável que ocorra uma extinção incompleta da CaO, podendo surgir nódulos de cal dentro da argamassa, que não foi convenientemente hidratada no momento da amassadura.

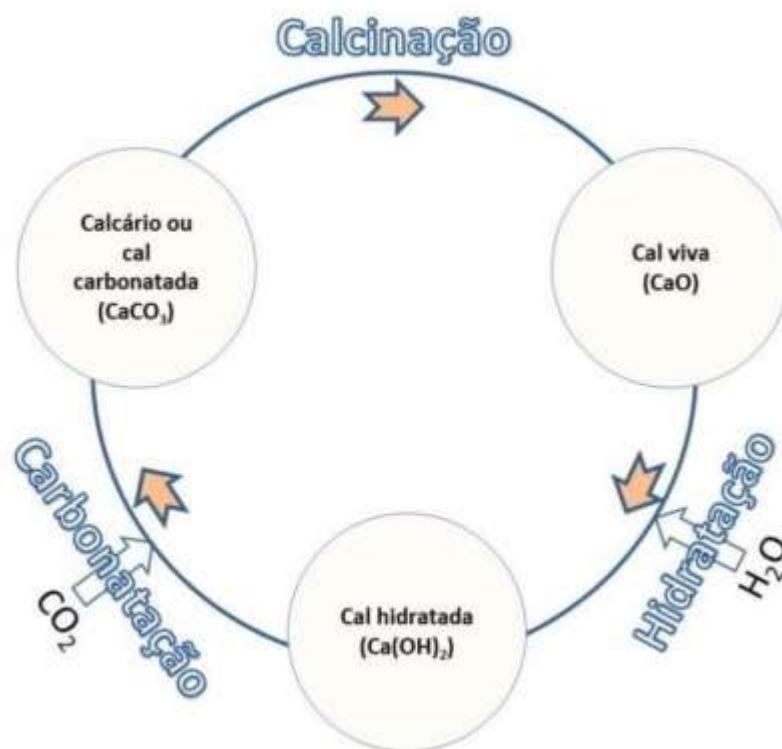


Figura 2.1. Ciclo da cal (Almeida, 2015).

2.2.2 Agregados

Agregado de argamassa é um material composto por partículas com formas, superfícies específicas e volumes diferentes. É o elemento, na maioria das vezes, em maior percentagem nas argamassas. Possui o objetivo de diminuir a retração, melhorar a compacidade, a impermeabilidade e a resistência mecânica da argamassa. É o componente da argamassa, que confere estabilidade volumétrica e melhora o comportamento mecânico, diminuindo também os vazios presentes na mistura, se possuir uma granulometria adequada (Margalha et al., 2007).

Pode-se classificar os agregados como sendo eles grossos e finos. Segundo as dimensões das partículas, os agregados podem ser finos, quando possuem partículas de menores dimensões e que passam na peneira de 4,75mm (naturais ou britadas), ou grossos, quando são retidos nessa peneira, geralmente possuindo origem sedimentar (rolado ou seixo) (Faria Rodrigues, 2004).

As argamassas contêm como agregados geralmente areias. Podem ter também fileres, tais como pós de pedra, ou agregados reciclados, nomeadamente material cerâmico. Constituindo o esqueleto das argamassas, as areias são materiais granulados finos que ganham coesão pela ligação dos seus grãos à pasta do ligante (Margalha et al., 2007).

A degradação da rocha produz as areias, que do ponto de vista químico podem-se dividir em vários grupos: areias calcárias, areais siliciosas (quartzosas e graníticas), areias de outros tipos de pedra, como as

basálticas. O desperdício gerado pelas pedreiras de rochas calcária geram as areais calcárias, enquanto as areias siliciosas são geralmente provenientes de rios ou de areeiros (Faria Rodrigues, 2004).

A morfologia das partículas dos agregados desempenha um papel extremamente importante no comportamento da argamassa, afetando a aderência da pasta de ligante ao agregado, a sua trabalhabilidade e a compacidade. De igual modo a forma do agregado é decisiva no valor da sua superfície específica, influenciando neste caso a quantidade de água para a amassadura e eventualmente as variações no comportamento da argamassa (Sousa Coutinho, 1997, citado por Almeida, 2015).

De acordo com estudos anteriores que apontam para um melhor desempenho de areias com granulometria variada, verifica-se que a mistura das areias mais finas com as mais grosseiras contribui para um melhor arranjo, reduzindo a porosidade, melhorando alguns parâmetros, como acréscimos nas resistências à flexão, à compressão e, em alguns casos, a diminuição da capilaridade (Margalha et al., 2007).

2.2.3 Adições e adjuvantes

Com o objetivo de melhorar a qualidade em geral ou determinadas propriedades das argamassas históricas eram às vezes acrescentadas as chamadas adições (quando era introduzido em teores significativos) e adjuvantes (quando era introduzido em teores muito reduzidos). Todos eram misturados durante a amassadura, podendo ter efeito apenas no estado fresco, ou podendo ter efeito no estado endurecido.

Os adjuvantes são materiais, geralmente orgânicos que adicionados às argamassas em quantidades relativamente pequenas (geralmente menos de 5% da massa do ligante), têm como principal papel reforçar as suas propriedades. São exemplo a adição de óleo de linhaça (Nunes et al., 2013) a utilização de fibras orgânicas (pêlo animal, fibras de plantas) encontradas em amostras de argamassas antigas da cidade de Rhodes (Grécia) (Moropoulou et al., 2000).

As adições são materiais, geralmente inorgânicos que podem ser utilizados em quantidade maiores que os adjuvantes (teores bastante superiores a 5% da massa do ligante). Tem-se como exemplos as pozolanas, como as cinzas vulcânicas e pós de telhas, ladrilhos e tijolos moídos (Faria, 2014).

2.3 Caracterização de argamassas antigas

No âmbito da conservação e preservação do património, muitos estudos têm sido desenvolvidos por diversos autores focando a caracterização física, mecânica, química, mineralógica e microestrutural de amostras de argamassas históricas de diferentes localizações do mundo, para que através do conhecimento e cruzamento de várias características diferentes das argamassas, se possa contribuir para o desenvolvimento de novas técnicas para proceder à reparação e conservação das construções onde elas se encontram (Damas et al., 2016).

Nesse contexto, procedeu-se a um levantamento da informação existente sobre um conjunto de argamassas históricas, principalmente Romanas, caracterizadas em estudos anteriores de vários autores, com o principal objetivo de extrair tendências relativas à época em que as amostras antigas se inserem. Esse estudo inicial consistiu numa recolha de informação de alguns casos de estudo que foi sintetizada em tabelas.

Existe a ideia de que para se ter o conhecimento científico completo acerca de uma amostra é necessária e suficiente a sua caracterização química e mineralógica (Veiga et al., 2001). Portanto foram elaboradas as Tabelas 2.1, Tabela 2.2 e Tabela 2.3 apresentando resultados de estudos químicos e mineralógicos de estudos anteriores. Este tipo de análise é indispensável para uma boa caracterização, permitindo conhecer, o tipo do ligante e do agregado utilizados, compostos presentes e a proporção presente nas amostras de argamassa. No entanto, essa proporção pode não ser a original devido ao envelhecimento, e eventual deterioração, entretanto ocorrida nas argamassas (Henriques e Faria Rodrigues, 2006).

Quando se tem uma noção do que se pretende encontrar, este tipo de avaliação por si só é valiosa. Mas para se ter uma análise completa e correta é necessária uma caracterização complementar realizada, se possível in situ e em laboratório, com ensaios mecânicos e físicos (Válek et al., 2005), como o módulo de elasticidade, a resistência a compressão e absorção de água por capilaridade. As Tabelas 2.1 a Tabela 2.3 também apresentam resultados de ensaios físicos e mecânicos de estudos anteriores em argamassas históricas. Também na discussão desses resultados é importante ter em conta que a amostra sofreu degradação e envelhecimento ao longo dos anos e não corresponde exatamente à argamassa original.

Tabela 2.1. Estudos em Kyme (Turquia), Mértola e Tróia (Portugal).

Ref. Bibliográfica/ Data Provável/ Local	Miriello et al., 2011/ Séc. VIII a.C./ Kyme (Turquia)	Silva et al., 2006(a)/ Séc. V - VI a.C./ Cidade de Mértola (Portugal), torre do rio e criptopórtico.	Silva et al., 2006(b)/ Final do séc. I a.C e início do séc. I d.C./ Península de Tróia (Portugal), pavimento de um reservatório de salga de peixe.
Observação das frações granulométrica a lupa binocular	Não realizado	Não realizado	Não realizado
Difracção de Raio X (DRX)	Não realizado	Composto maioritários quartzo e calcite.	Frações globais: maioritários quartzo e calcite. Frações finas: sobreposição da calcite sobre o quartzo.
Análise Termogravimétrica (ATG) e Termogravimétrica Diferencial (DTG)	Não realizado	Típicos de argamassas calcárias, com perda de massa acentuada entre 650 e 820°C.	
Caracterização petrográfica	As morfologias dos agregados apresentam pouca redondeza e subangular.	Variando de redondo a semi angular, dominado por quartzo, feldspato e cerâmica triturada.	Presença de areia siliciosa com morfologia redonda em todas as amostras.
Microscopia Electrónica de Varrimento (SEM/EDS)	Foi comparado a hidraulicidade dos nódulos de cal e do ligante, variando o ligante de 0,04% a 5,89% e os nódulos de cal de 0,03% a 0,18%.	Presença de colónias biológicas de microorganismos. Presença de silicato de cálcio na interface agregado/ligante.	Microestrutura rica em géis formados em argamassas de ligante hidráulico e microestrutura típica de argamassa de cal composta por cristais de carbonato de cálcio.
Caracterização granulométrica	Não realizado	Fração 2,5-0,63mm predominante.	Uma amostra com fração 0,16-0,63mm predominante, as outras duas amostras com fração predominante > 5,0mm.
Absorção de água por capilaridade	Não realizado	Não realizado	Não realizado
Módulo de Elasticidade por Ultra-Sons	Não realizado	Não realizado	Não realizado
Resistência à compressão	Não realizado	Não realizado	Não realizado

Tabela 2.2. Estudos em Lisboa, Conímbriga e Beja (Portugal)

Ref. Bibliográfica/ Data Provável/ Local	Almeida et al., 2017 /Séc. I e finais do III - IV d.C./ Colina de S. Jorge, núcleo histórico de Lisboa (Portugal).	Velosa et al., 2007/ Entre os Séc. I a.C. e séc. V d.C./ Conímbriga (Portugal)	Silva et al., 2019/ Entre os Séc. I e séc. IV d.C./ Beja (Portugal)
Observação das frações granulométrica a lupa binocular	Prevalência de agregado silicioso, maioritariamente quartzo. Conchas carbonatadas. Grau de rolamento de sub-ângulo a rolado.	Não realizado	Não realizado
Difracção de Raio X (DRX)	Frações globais: maioritários quartzo e calcite. Frações finas: tendência de sobreposição da calcite sobre o quartzo.	Composto maioritários quartzo e calcite.	Composição maioritária calcite, quartzo e feldispato.
Análise Termogravimétrica (ATG) e Termogravimétrica Diferencial (DTG)	Termogramas típicos de argamassa com cal aérea, com perda de massa acentuada de 600 a 850°C	Termogramas típicos de argamassas antigas de cal, com perda de massa acentuada entre 600 e 810°C.	Termogramas típicos de argamassas antigas de cal, com perda de massa acentuada entre 600 e 900°C.
Caracterização petrográfica	Textura semelhante entre amostras com agregado silicioso distribuídos de forma homogénea e conchas carbonatadas.	Não realizado	Nódulos de cal arredondados, pouca coesão e microfissuração. Agregados quartzíticos com morfologia subangular a arredondada. Presença de cerâmica triturada.
Microscopia Electrónica de Varrimento (SEM/EDS)	Presença de silicatos de alumínio e de cálcio nas interfaces agregado/ligante. Depósitos de carbonato de cálcio revestindo os limites dos poros e microfissuras.	Matriz calcária com grãos de calcita visíveis, agregados cerâmicos dispersos através da matriz.	A matriz das argamassas é totalmente carbonatada e distribuída de forma homogénea. As partículas do ligante apresentam morfologias heterogéneas, atribuídas a diferentes processos de formação de calcita.

Tabela 2.2. Estudos em Lisboa, Conímbriga e Beja (Portugal) (continuação)

Ref. Bibliográfica/ Data Provável/ Local	Almeida et al., 2017 /Séc. I e finais do III - IV d.C./ Colina de S. Jorge, núcleo histórico de Lisboa (Portugal).	Velosa et al., 2007/ Entre os Séc. I a.C. e séc. V d.C./ Conímbriga (Portugal)	Silva et al., 2019/ Entre os Séc. I e séc. IV d.C./ Beja (Portugal)
Caracterização granulométrica	Fração 1,25-0,63mm predominante. Areias grossas e balastros >55% dos agregados	Não realizado	Fração 2,5-0,63mm predominante.
Absorção de água por capilaridade	Comparável com argamassas antigas de cal em bom estado de conservação.	Não realizado	Não realizado
Módulo de Elasticidade por Ultra-Sons	Duas amostras com MED reduzido (~170MPa) e uma amostra com mais elevado (1325MPa).	Não realizado	Não realizado
Resistência à compressão	0,39-1,61 N/mm ²	Não realizado	Não realizado
Porosidade Aberta	Não realizado	Não realizado	Não realizado

Tabela 2.3. Estudos em Portalegra, Albufeira, Lisboa e Coimbra (Portugal)

Ref. Bibliográfica/ Data Provável/ Local	Silva et al., 2014/ Entre séc. I a.C e Séc. V d.C/ Ammaia, Portalegra (Portugal)	Parracha et al., 2020/ Séc. XII/ Castelo de Paderne, Albufeira (Portugal), muro, torre e capela.	Damas et al., 2018/ Séc. XVI ao Século XX/ Argamassa de colagem de azulejos antigos (Lisboa e Coimbra)
Observação das frações granulométrica a lupa binocular	Não realizado	Prevalência de agregados siliciosos e calcários, coesão média. Grau de rolamento de sub angular a redondo.	Não realizado

Tabela 2.3. Estudos em Portalegra, Albufeira, Lisboa e Coimbra (Portugal) (Continuação)

Ref. Bibliográfica/ Data Provável/ Local	Silva et al., 2014/ Entre séc. I a.C e Séc. V d.C/ Ammaia, Portalegra (Portugal)	Parracha et al., 2020/ Séc. XII/ Castelo de Paderne, Albufeira (Portugal), muro, torre e capela.	Damas et al., 2018/ Séc. XVI ao Século XX/ Argamassa de colagem de azulejos antigos (Lisboa e Coimbra)
Difracção de Raio X (DRX)	o mineral predominante é o quartzo, que está presente em todas as amostras, bem como o feldspato e a mica. Calcite foi identificado como a principal aglutinante.	Composição maioritária calcite, depois tem quartzo e feldspato, detetados também mica e óxidos de ferro.	Principal aglutinante é calcite com agregados de silício para região de Lisboa. Principal aglutinante é dolomítica com agregados de silício e argila para região de Coimbra
Análise Termogravimétrica (ATG) e Termogravimétrica Diferencial (DTG)	Termogramas típicos de antigas argamassas calcárias, com perda de massa acentuada após 650°C.	Termogramas típicos de argamassa com cal aérea, com perda de massa acentuada de 550 a 900°C	Termograma típico de argamassas de cal aérea calcítica para região de Lisboa. Termograma típico de argamassa de cal aérea dolomítica para região de Coimbra
Caracterização petrográfica	Não realizado	Agregados de dimensões variadas, pouco homogéneas, presença de agregado calcário.	Não realizado
Microscopia Electrónica de Varrimento (SEM/EDS)	A maioria das amostras tem uma microestrutura compacta, bem embebidos na matriz de ligante.	bastante rica em cal cálcica e apresenta como agregados grãos de quartzo, calcário, feldspatos e mica. A pasta da amostra é relativamente heterogénea em termos composicionais	os agregados são inquestionavelmente siliciosos, apresentando bastante quartzo e feldspatos foram também visíveis em alguns casos grãos de cal. Com esta confirmação, é seguro afirmar que o teor dos carbonatos presentes nas amostras deriva essencialmente do ligante.

Tabela 2.3. Estudos em Portalegra, Albufeira, Lisboa e Coimbra (Portugal) (Continuação)

Ref. Bibliográfica/ Data Provável/ Local	Silva et al., 2014/ Entre séc. I a.C e Séc. V d.C/ Ammaia, Portalegra (Portugal)	Parracha et al., 2020/ Séc. XII/ Castelo de Paderne, Albufeira (Portugal), muro, torre e capela.	Damas et al., 2018/ Séc. XVI ao Século XX/ Argamassa de colagem de azulejos antigos (Lisboa e Coimbra)
Caracterização granulométrica	A granulometria predomina-se entre 1,0 e 0,5 mm.	A granulometria predomina-se entre 1,0 e 0,5 mm.	Não realizado
Absorção de água por capilaridade	Não realizado	Não realizado	Os coeficientes de capilaridade estão variando entre 0,27 e 2,91 [kg/(m ² .min ^{1/2})]
Módulo de Elasticidade por compressão	Não realizado	Não realizado	Não realizado
Resistência à compressão	Não realizado	Não realizado	Os valores variam entre 0,62 e 3,34 N/ mm ²
Porosidade Aberta	Não realizado	Não realizado	Os valores variam entre 23,5 e 36%

3. Descrição do sítio arqueológico do Creiro; Arrábida

O sítio arqueológico do Creiro integra-se no Parque Natural da Arrábida e pertence à freguesia de S. Lourenço, concelho e distrito de Setúbal com as seguintes coordenadas: 38° 28' 53.50"N; 8° 58' 36.48"W, Figura 3.1. Foi construído provavelmente entre o século I a.C. e o século III d.C. e possuía uma planta retangular de área estimada de 730 m² (Silva e Soares, 2016).



Figura 3.1. Localização do sítio arqueológico do Creiro (Silva e Soares, 2016).

O sítio arqueológico do Creiro foi identificado por António Inácio Marques da Costa pela primeira vez em 1907 (Marques da Costa, 1907), no estudo sobre as estações pré-históricas dos arredores de Setúbal. António da Costa marca com um R o Creiro no esboço de carta, Figura 3.2, cuja legenda significa “estações romanas muito acentuadas” (Marques da Costa, 1907); porém no texto não cita nada sobre este sítio arqueológico.

Este sítio arqueológico está localizado sobre um pequeno planalto formado por terreno argiloso, que existe na encosta sul da Serra da Arrábida. Este planalto possui cota de 20-30 metros, é limitado a leste e a oeste por vales onde correm linhas de água, e limitado a sul pela praia do Portinho da Arrábida, vencendo um desnível de aproximadamente 15 metros (Silva e Soares, 1987).

A riqueza piscícola, principalmente em sardinha, da costa meridional da Arrábida, as excelentes condições naturais da enseada do Portinho e a existência de nascente de água doce teriam representado os principais fatores responsáveis pela escolha do Creiro para a implantação de um núcleo fabril de produção de preparados de peixe no período de domínio Romano na região (Silva e Soares, 2016).

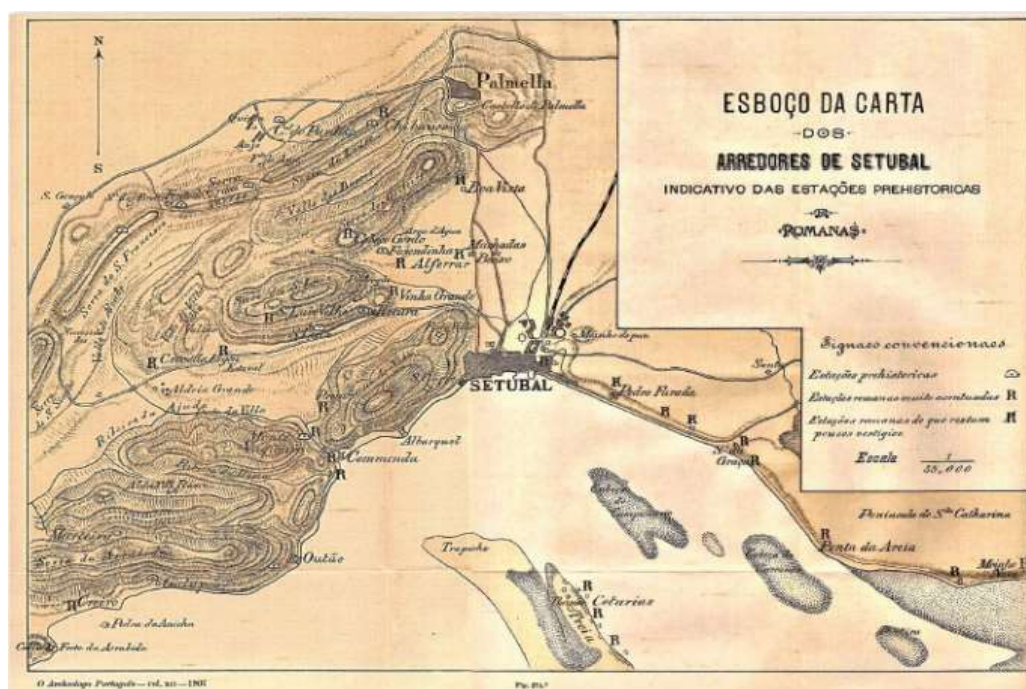


Figura 3.2. Esboço da Carta dos arredores de Setúbal (Cardoso, 2014).

O Museu de Arqueologia e Etnografia do Distrito de Setúbal (MAEDS) promoveu escavações, desde 1987, que permitiram identificar a planta de uma fábrica de preparados piscícolas da época romana, aqui denominada por G12, Figura 3.3 (Silva e Soares, 1987).

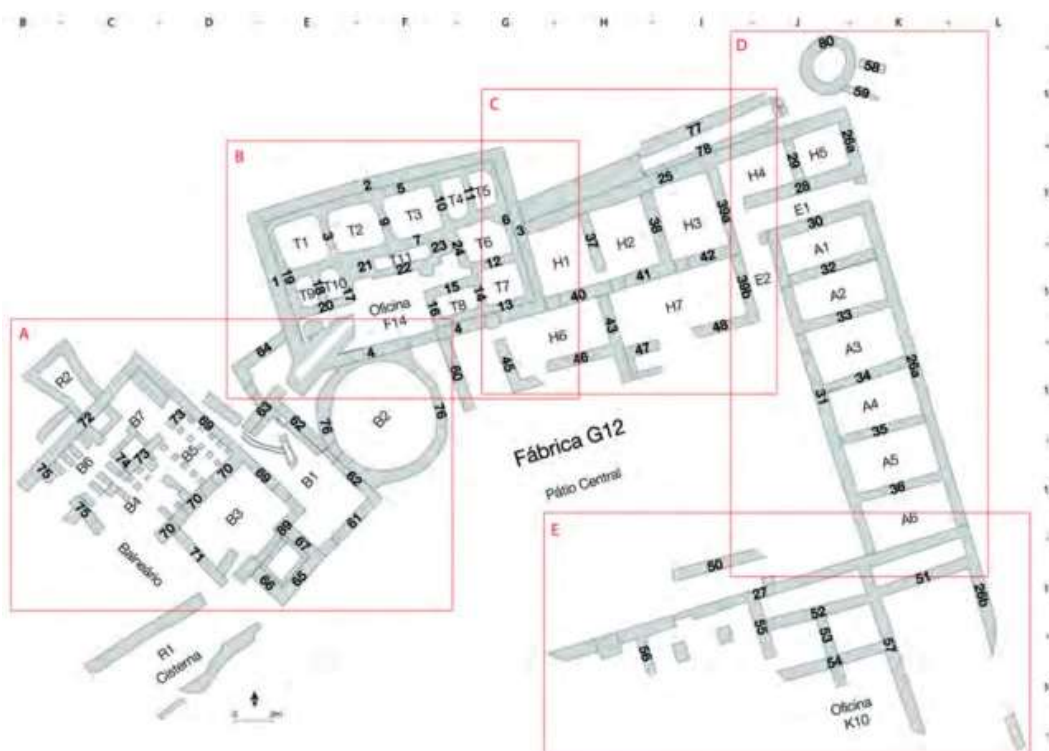


Figura 3.3. Fábrica G12 de preparados piscícolas (Silva e Soares, 2016).

Numa oficina de produção de salgas e molhos de peixe, que contém um conjunto de tanques de salga, designada por Oficina F14 (Silva e Soares, 1987), associado a esta oficina, foi construído compartimentos de armazenagem, balneário e compartimentos provavelmente habitacionais organizados em torno de um pátio. Na parte exterior deste recinto murado, surgiram um poço, uma cisterna e estruturas pertencentes a outra oficina de produção de salgas, designada por Oficina K10 (Silva e Soares, 2016).

A área do sítio arqueológico é limitada a norte pelo muro 2, da oficina F14, e pelo muro 25 do edifício H, formado por subdivisões em planta retangulares (H1-H7); leste pelo muro 26a, ao longo do qual foram construídos compartimentos de armazéns (A1-A6); sul pelo muro 27, onde havia a entrada principal que dava acesso ao pátio central. O muro que por hipótese limitava a oeste, foi destruído em grande parte para a construção do balneário, resta o muro 1 da Oficina F14 (Silva e Soares, 2016).

Na parte exterior da fábrica, identifica-se uma cisterna a sudoeste, um poço a nordeste, enquanto que a sudeste, no encontro do muro 26b com muro 27, foi construída uma outra oficina de produção de preparados de peixe, designada por Oficina K10 (Silva e Soares, 2016).

A Oficina F14, Figura 3.4, que fica situada no limite norte da Fábrica G12, completamente murada, possui onze tanques e um pátio aberto a sul. Os tanques são divididos em dois grupos funcionais. Os tanques mais importantes são os destinados à produção de salga e molhos de peixe (Tanques 1-5 e Tanques 7-10). Em termos de revestimento destes tanques “O fundo e as paredes são revestidos por *opus signinum* desprovido de fragmentos de cerâmica,” (Silva e Soares, 1987).

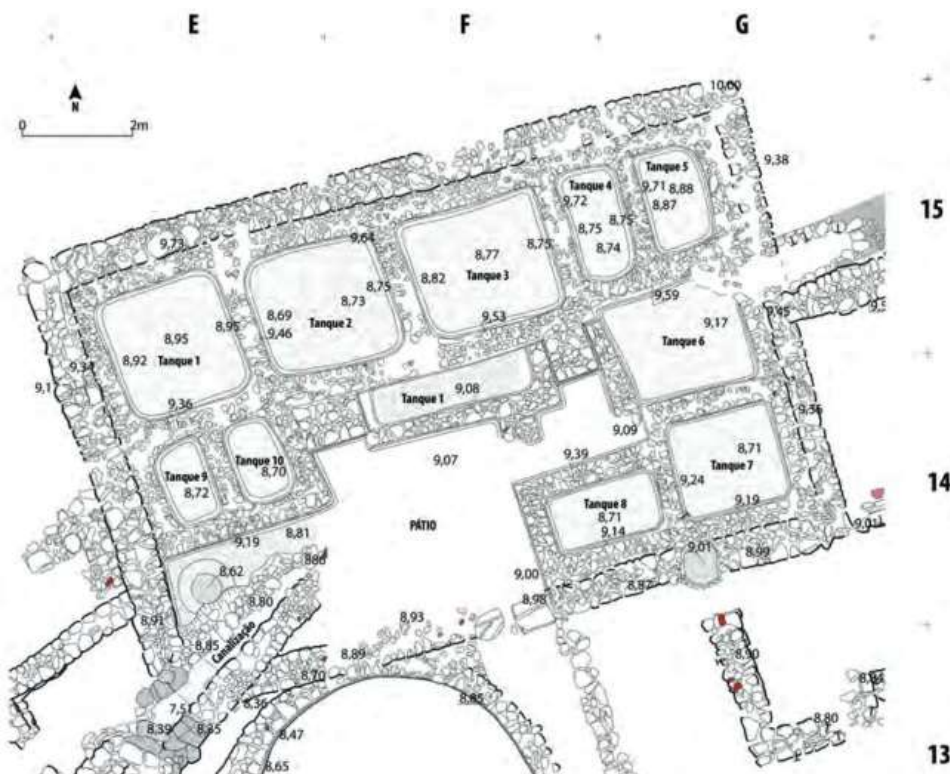


Figura 3.4. Planta mais detalhada Oficina F14 sinalizada na Figura 3.3 (Silva e Soares, 2016).

Os tanques do outro grupo funcional são menos profundos, representados pelos Tanque 6 e 11 e correspondem à 1ª fase de remodelação da fábrica. Nestes tanques foi utilizado como fundo o pavimento do pátio da oficina, menos impermeável. Por isso deviam ter função diferente, podendo ter sido utilizados como reservatórios de sal. As paredes destes tanques foram revestidas por “argamassa de cal, areia e cascalho angular” (Silva e Soares, 1987).

O Edifício H apresenta planta retangular com 2,45 m por 8,37 m, Figura 3.5. É constituído por cinco compartimentos (H1-H3, H6 e H7). Os muros que separam os diversos compartimentos possuem espessura de 0,5 m, foram construídos com alvenaria de pedra irregular, geralmente de calcário comum. Os compartimentos H6 e H7 teriam sido construídos em fase de remodelação enquanto os compartimentos H1-H3 parecem ter sido contemporâneos da oficina F14 (Silva e Soares, 2016).

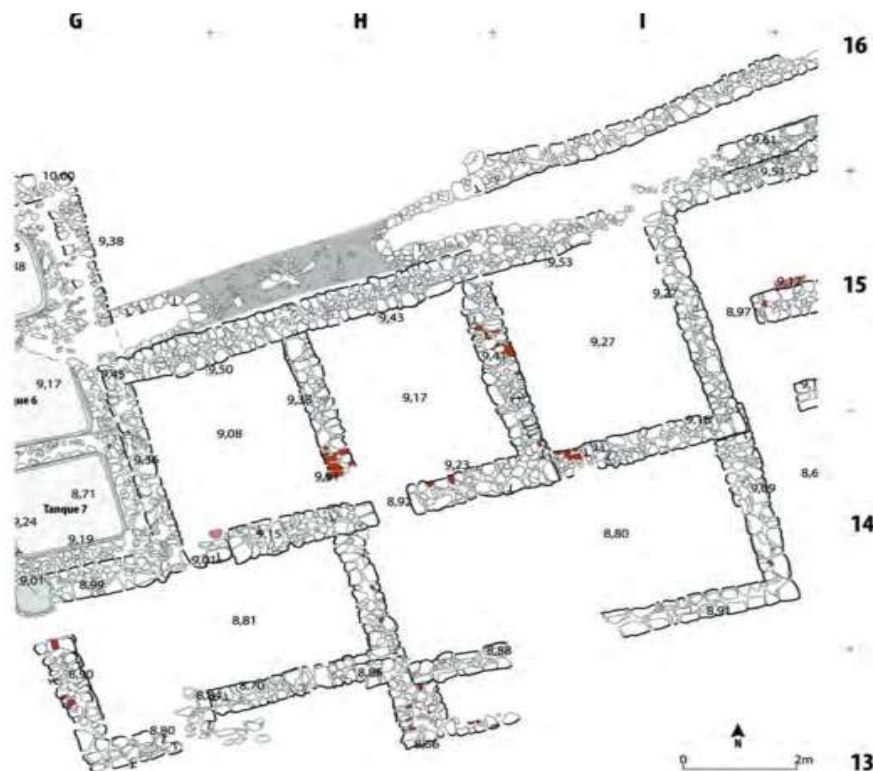
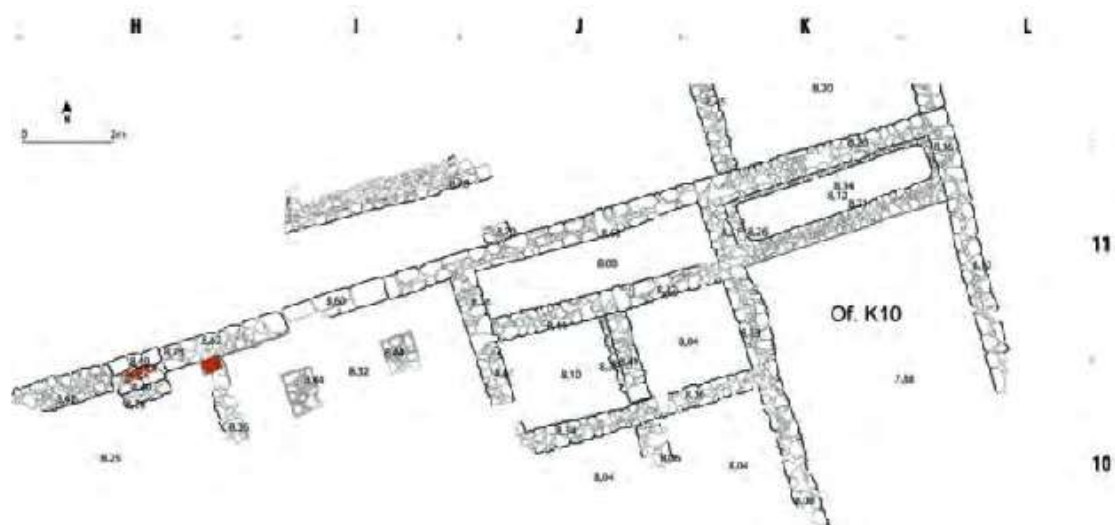


Figura 3.5: Planta mais detalhada do Edifício H sinalizada da Figura 3.3 (Silva e Soares, 2016).

Os muros do Edifício H possuem blocos de pedras de maiores dimensões, semi aparelhados e sem a existência de pequenos blocos de pedra entre eles, por isso acredita-se que a sua construção seja anterior à da Fábrica G12 (Silva e Soares, 2016).

Os armazéns são compostos por seis compartimentos (A1-A6) que possuem dimensões muito semelhantes e planta retangular, com comprimento oscilando entre 4,3 m e 4,6 m e largura oscilando entre 1,9 m e 2,6 m. Os muros que separam os compartimentos são constituídos por alvenaria de pedra irregular não aparelhados, idênticos aos muros do Edifício H (Silva e Soares, 2016).

A oficina K10, Figura 3.6, sem qualquer intervenção arqueológica em profundidade, integraria uma outra fábrica de produção de preparados de peixe.



O Balneário apresenta planta incompleta, Figura 3.7, estando destruído a sul, resultado da erosão e da implantação de construções clandestinas durante o século XX, entretanto demolidas. O Balneário é subdividido em vestíbulo, uma sala circular, um frigidário com tina com vestígios de ter sido forrada a mármore, três compartimentos aquecidos por *hipocaustum*, e um compartimento de apoio a fornalha. Os muros do Balneário, incluindo os do *hipocaustum* possuem blocos de pedra semi aparelhados e argamassa de cal e areia (Silva e Soares, 2016).

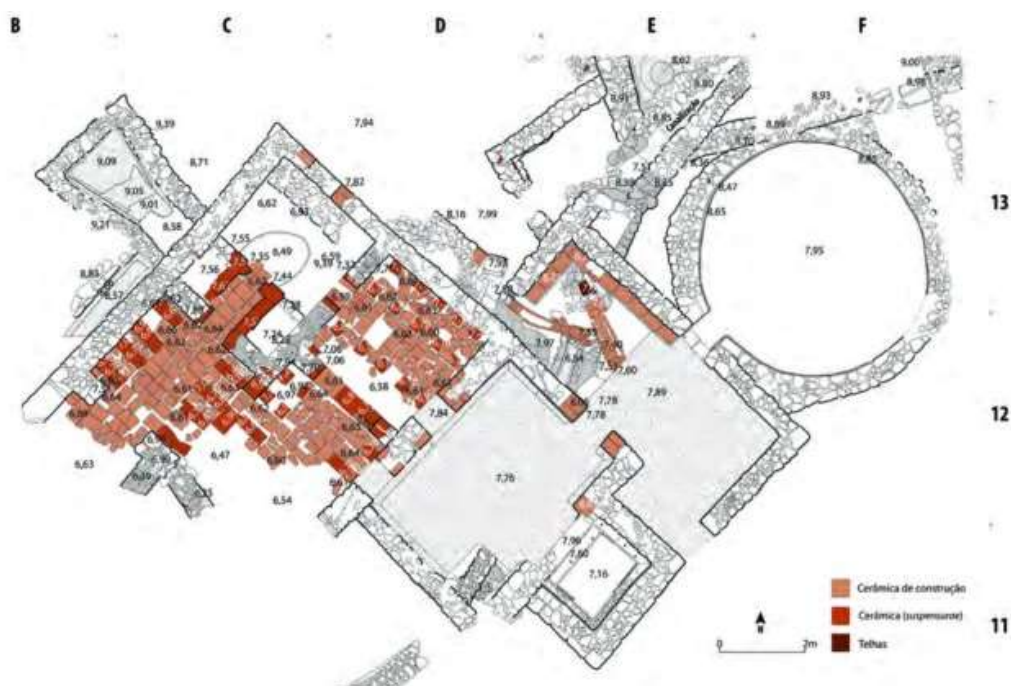


Figura 3.7. Planta mais detalhada do Balneário sinalizada na Figura 3.3 (Silva e Soares, 2016).

Na parte exterior da Fábrica G12, no canto nordeste, aparece a boca de um poço circular com 1,8 m de diâmetro interno e muros de 0,55 m de espessura de alvenaria de pedra não aparelhada. A cisterna está situada a sul do Balneário e não foi objeto de escavação arqueológica. Está localizada na encosta que desce para a praia e a erosão que tem atuado nela deixou expostos parte de seus muros laterais (Silva e Soares, 2016).

4. Campanha Experimental

4.1 Campanha experimental *in situ*

Foi feita uma visita ao sítio arqueológico do Creiro, no dia 09 de setembro de 2020, para realização de ensaios experimentais não destrutivos *in situ* e recolha de amostras para os ensaios experimentais a realizar em laboratório e para a musealização na base de dados física do projeto DB-Heritage, no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

Os ensaios experimentais *in situ* tem o objetivo de avaliar as condições superficiais dos materiais que constituem o sítio arqueológico do Creiro. Foram executados não só pelo autor, mas também pelo Eng. Vitor Silva, Eng. Ingrid Lima e Prof. Paulina Faria, entre as 10:30h e as 12:30h, altura em que os valores de temperatura (T) eram de 27°C no início dos ensaios e 33°C no final dos ensaios, e os valores de humidade relativa (HR) eram de 68% no início dos ensaios e 60% no final dos ensaios.

4.1.1 Mapeamento

Foi realizada uma visita de apresentação, identificação e avaliação do sítio arqueológico do Creiro, juntamente com um técnico do Museu de Arqueologia e Etnografia do Distrito de Setúbal (MAEDS), em que foi possível escolher os locais em melhores condições para realização dos ensaios *in situ* planeados. A partir daí criou-se a Tabela 4.1 para identificar os locais dos casos de estudo e os respetivos tipos de ensaios realizados, juntamente com a Figura 4.1 que representa a planta baixa do sítio arqueológico do Creiro, sendo marcados a vermelho os locais de realização dos ensaios não destrutivos *in situ*.

Tabela 4.1 – Ensaios *in situ* realizados e sua localização no sítio do Creiro.

Casos de estudo	Impacto por choque de esfera	Resistência superficial pelo esclerómetro pendular	Resistência superficial por durómetro	Absorção de água sob pressão por tubos de Karsten
Cisterna parede sul			X	X
Cisterna parede norte	X	X	X	X
Construção circular			X	
Tanques Of. F14 poente		X	X	X
Tanques Of. F14 sul		X	X	X
Frigidarium poente		X	X	
Frigidarium sul		X	X	

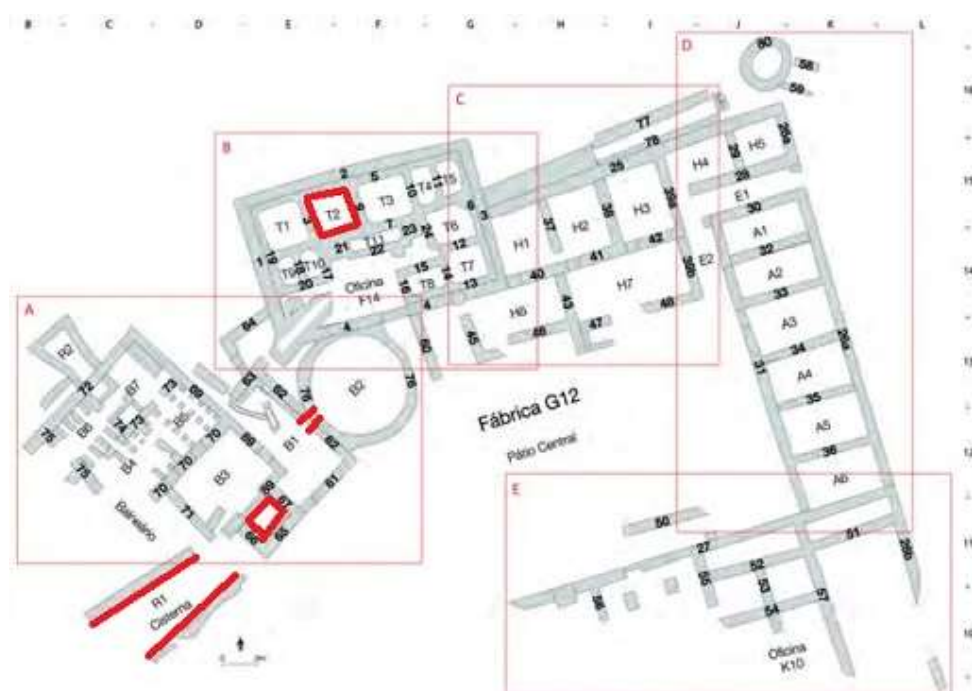


Figura 4.1. Localização dos ensaios realizados in situ (sobre figura de Silva e Soares, 2016).

4.1.2 Impacto por choque de esfera

O ensaio de impacto por choque de esfera foi realizado com base na ficha de ensaio FE Pa 25 (LNEC, 1980). Este ensaio foi realizado apenas na parede da cisterna norte pois era o único local com área suficiente e plano perfeitamente vertical. O ensaio é realizado com utilização do aparelho *Martinet-Baronnie*, visível na Figura 4.2(a). O aparelho é colocado na posição horizontal perpendicular à parede, ou seja, de maneira a formar um ângulo de 90° com a parede a ser analisada. Deixa-se cair o braço do aparelho que possui comprimento de 0,60 m e que possui na sua extremidade uma esfera de aço com 50 mm de diâmetro e 0,5 kg de massa. Um choque entre a esfera e a superfície provoca uma massa na superfície a ser analisada, é medido o diâmetro dessa massa com auxílio de um paquímetro digital e observado se ocorre ou não fendilhação devido a esse impacto. O ensaio permite avaliar diretamente a deformabilidade do material e indiretamente a coesão e aderência ao suporte. Quanto menor o diâmetro da massa provocado pela esfera na superfície, maior será a resistência do material e menor a sua deformabilidade. Caso o choque venha a provocar fissuras na superfície, isto indicará também que o material é menos deformável.

4.1.3 Resistência superficial por esclerómetro pendular

O ensaio de resistência superficial por esclerómetro pendular foi realizado com base na norma ASTM C805 (ASTM, 2008). Este ensaio foi realizado nos locais onde possuía área suficiente e plano perfeitamente

vertical. O ensaio é realizado com a utilização de um aparelho esclerômetro de pêndulo do modelo *Schmidt PT*, visível na Figura 4.3(b). O aparelho é posicionado na vertical numa superfície vertical; a seguir, o pêndulo é liberado através de uma mola, e ressalta após provocar um impacto contra a superfície em análise. O valor do ressalto é medido numa escala graduada presente no equipamento. O ensaio permite avaliar a resistência mecânica através da dureza superficial.



Figura 4.2. Ensaio de impacto de esfera com o aparelho *Martinet-Baronnie* (a) e ensaio com esclerômetro pendular (b).

A classificação dos resultados foi realizada baseando-se na ficha de ensaio FE Pa 39 (LNEC, 2016), apresentada na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Classificação da resistência superficial (LNEC, 2016).

Intervalo de valores do ressalto (Vickers)	Classificação da resistência superficial
[0 ; 20[Pobre
[20 ; 30[Média
[30 ; 40[Suficiente
[40 ; 55[Boa
[55 ; 75[Muito Boa
[75 ; 100]	Excelente

4.1.4 Resistência superficial por durômetro

O ensaio de resistência superficial por durômetro foi realizado com base na norma ASTM D2240-5 (ASTM, 2010) e a ficha de ensaio Fe Pa 49.1 (LNEC, 2016). O objetivo do ensaio é registrar a resistência superficial à penetração de um pino/agulha que fica na extremidade do aparelho, Figura 4.3(a). Para realizar as medições o equipamento deve ser pressionado de forma perpendicular à superfície a ser analisada, para que a mola seja acionada e o ponteiro do mostrador se mova e determine a resistência em uma escala de 0 a 100 Shore A.

(a)



(b)



Figura 4.3. Ensaio de dureza superficial com durômetro Shore A (a) e ensaio de absorção de água com tubos de Karsten (b).

4.1.5 Absorção de água sob pressão por tubos de Karsten

O ensaio de absorção de água sob baixa pressão por tubos de Karsten foi realizado com base na norma EN 16302 (CEN, 2013a). Este ensaio foi realizado em locais que tinham rebocos em bom estado de conservação e em zonas que antes tinham tido contato com água, como sejam a cisterna e cetáreas. O ensaio de absorção de água tem o objetivo de avaliar a permeabilidade do revestimento. É efetuada a medição da quantidade de água absorvida durante um determinado período tempo, em uma determinada área de contato. Os tubos de Karsten, Figura 4.3(b), que foram utilizados para a realização desse ensaio têm uma graduação de 0 a 4 mL. Com auxílio de plasticina resistente a água, os tubos de Karsten são fixados na superfície a ser analisada, são preenchidos com água até a marca de 4 mL e dá-se início à contagem do tempo com auxílio do cronômetro.

Determina-se o valor da quantidade de água absorvida a baixa pressão por unidade de área no instante i , W_i em mL/cm², pelo quociente da quantidade de água absorvida no instante i , Q_i em mL, pela área A da abertura do tubo em contato com a superfície a ser ensaiada, em cm².

4.2 Recolha das amostras

A recolha das amostras foi realizada com apoio da Prof. Paulina Faria, Eng. Vitor Silva e Dr. António Santos Silva, e incidiu na identificação de rebocos soltos ou caídos ao chão próximo do suporte. As amostras de betões romanos estavam todas soltas no chão próximas ao local de origem. As amostras eram recolhidas e armazenadas em sacos plásticos. A recolha das amostras foi acompanhada pelo técnico do Museu de Arqueologia e Etnografia do Distrito de Setúbal (MAEDS). Na figura 4.4 estão identificados os locais de recolha das amostras. Na Tabela 4.3 estão identificados os locais de recolha e as siglas que definem o nome e número das amostras.

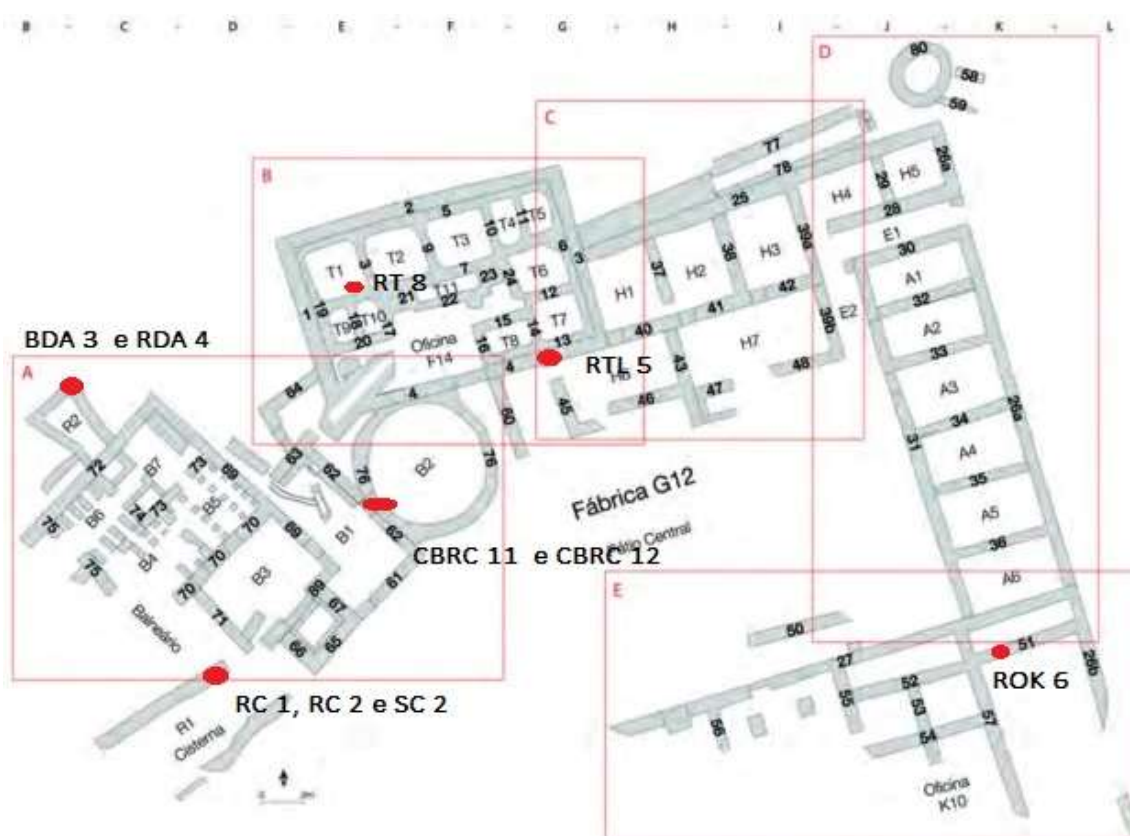


Figura 4.4. Locais de recolha das amostras (sinalizados sobre figura de Silva e Soares, 2016).

Tabela 4.3 – Nomenclatura das amostras.

Reboco da Cisterna	RC 1
	RC 2
Suporte do reboco da Cisterna	SC 2
Reboco do Depósito de Água	RDA 4
Revestimento da Tina de Lavagem	RTL 5
Revestimento Oficina K10	ROK 6
Revestimento local Não Identificado	RNI 7
Revestimento do Tanque	RT 8
Camada de Base do Reboco da construção Circular	CBRC 11
	CBRC 12
Betão do Depósito de Água	BDA 3
Betão do Balneário	BB 9
	BB 13
	BB 14

4.3 Campanha experimental dos ensaios físicos e mecânicos em laboratório

4.3.1 Preparação das amostras de argamassas e betões romanos

Antes da realização dos ensaios foi feita uma limpeza com escova nas amostras com a intenção de remover partículas soltas e colonizações biológicas menos aderentes.

Algumas amostras de reboco foram recolhidas aderidas a pedras da alvenaria do suporte e estas pedras foram removidas para ficarem apenas os rebocos a serem ensaiados.

As amostras de betões possuíam grandes dimensões e foi possível cortar em provetes cúbicos para a realização dos ensaios, Figura 4.5. Após os cortes, todos os provetes foram colocados em estufa a 50 °C durante 2 dias.

Os provetes e suas dimensões estão listados na Tabela 4.4



Figura 4.5. Corte das amostras de betão para preparação dos respetivos provetes.

Tabela 4.4. Identificação dos provetes.

Amostra	Provetes	Dimensões (cm)	Observações
RC 1	RC 1.1	13,5 x 9,0 x 2,0	Dimensões máximas das amostras de reboco (com formas não retangulares perfeitas)
	RC 1.2	13,5 x 11,5 x 2,0	
RC 2	RC 2.1	4,0 x 12,0 x 2,0	
	RC 2.2	4,5 x 12,0 x 2,0	
RDA 4	RDA 4	12,0 x 8,0 x 8,0	
RTL 5	RTL 5	12,5 x 4,0 x 3,0	
ROK 6	ROK 6	8,0 x 10,0 x 3,0	
RNI 7	RNI 7	16,0 x 11,0 x 2,0	
RT 8	RT 8	7,0 x 5,0 x 2,0	
CBRC 11	CBRC 11.1	8,0 x 9,5 x 1,5	
	CBRC 11.2	3,5 x 4,5 x 1,0	
CBRC 12	CBRC 12.1	4,0 x 7,0 x 1,0	Provetes quase cúbicos de betão
	CBRC 12.2	4,0 x 5,0 x 1,0	
SC 2	SC 2.1	6,2 x 6,0 x 5,6	
	SC 2.2	6,1 x 6,2 x 5,7	
	SC 2.3	6,4 x 5,8 x 5,6	

Tabela 4.4. Identificação dos provetes (continuação)

Amostra	Provetes	Dimensões (cm)	Observações
BDA 3	BDA 3.1	6,6 x 6,3 x 6,0	Provetes quase cúbicos de betão
	BDA 3.2	6,7 x 6,3 x 6,0	
	BDA 3.3	6,9 x 6,3 x 6,5	
	BDA 3.4	6,4 x 6,3 x 6,5	
	BDA 3.5	6,8 x 6,4 x 6,0	
BB 9	BB 9.1	7,0 x 6,3 x 6,0	
	BB 9.2	6,7 x 6,5 x 6,6	
	BB 9.3	7,2 x 6,5 x 6,7	
	BB 9.4	6,4 x 5,4 x 6,4	
	BB 9.5	6,6 x 5,9 x 6,1	
	BB 9.6	6,7 x 6,1 x 6,2	
BB 13	BB 13.1	6,6 x 6,4 x 6,5	
	BB 13.2	6,7 x 6,5 x 6,0	
	BB 13.3	6,7 x 6,4 x 6,7	
	BB 13.4	6,6 x 6,5 x 6,6	
	BB 13.5	6,7 x 6,0 x 5,4	
	BB 13.6	6,6 x 6,5 x 6,0	
BB 14	BB 14.1	6,6 x 6,5 x 6,2	
	BB 14.2	7,0 x 6,4 x 6,7	

4.3.2 Resistência superficial por durômetro

O ensaio de resistência superficial por durômetro foi realizado seguindo os mesmos procedimentos e normas adotados no subcapítulo 4.1.2.3.



Figura 4.6. Ensaio de resistência superficial com durômetro em amostra de betão Romano.

4.3.3 Massa volúmica

O ensaio de massa volúmica pelo método geométrico foi utilizado nos provetes cúbicos mais regulares, apresentados na Tabela 4.5. Este ensaio consiste na pesagem dos provetes em balança com precisão de 0,001 g, Figura 4.7a, e na medição de suas dimensões, com auxílio de um paquímetro digital, para calcular o seu volume, Figura 4.7b. Assim, a massa volúmica ρ , expressa em kg/m^3 , é o valor da massa do provete, expressa em kg, dividido pelo seu volume, expressa em m^3 .

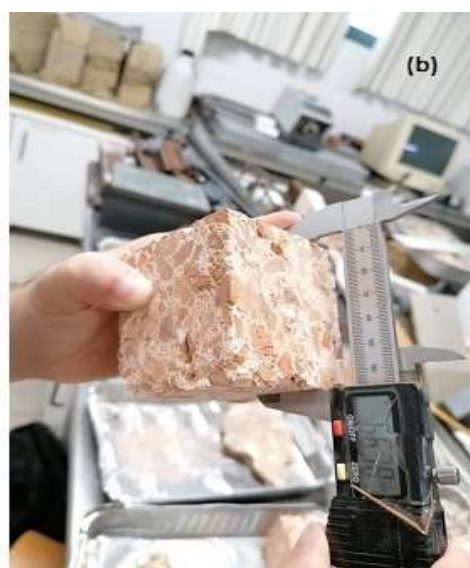


Figura 4.7. Pesagem (a) e medição das dimensões (b) dos provetes quase cúbicos.

Tabela 4.5. Provetes escolhidos para massa volúmica pelo método geométrico.

Amostra	Provetes	Dimensões (cm)
SC 2	SC 2.2	6,1 x 6,2 x 5,7
BDA 3	BDA 3.1	6,6 x 6,3 x 6,0
	BDA 3.5	6,8 x 6,4 x 6,0
BB9	BB 9.3	7,2 x 6,5 x 6,7
	BB 9.4	6,4 x 5,4 x 6,4
	BB 9.6	6,7 x 6,1 x 6,2
BB 13	BB 13.2	6,7 x 6,5 x 6,0
	BB 13.4	6,6 x 6,5 x 6,6
BB 14	BB 14.1	6,6 x 6,5 x 6,2

4.3.4 Porosidade aberta, massa volúmica aparente e massa volúmica real

O ensaio de porosidade aberta, massa volúmica aparente e massa volúmica real foi realizado com base na ficha de ensaio FE Pa 44 (LNEC, 2015c). Os provetes foram colocados num exsiccador com sílica até atingirem a temperatura ambiente. Os provetes secos foram pesados (md) com uma balança de precisão 0,001 g, de seguida tornou a colocar-se os provetes no exsiccador, agora ligado à bomba de vácuo, e baixou-se gradualmente a pressão até 40 kPa. O vácuo foi mantido durante 24h de modo a eliminar o ar contido nos poros abertos dos provetes, Figura 4.8a. Após este período, iniciou-se a introdução de água destilada no exsiccador, que permitiu que os provetes ficassem totalmente imersos, Figura 4.8b. Os provetes ficaram imersos por 24h. Ao final deste período, a bomba foi desligada e o exsiccador aberto. Após cerca de 30 minutos foi feita a pesagem hidrostática dos provetes, Figura 4.8c, e a determinação da sua massa enquanto imersos (mh). Retirou-se o excesso de água com um pano húmido e determinou-se a massa dos provetes saturados (ms).

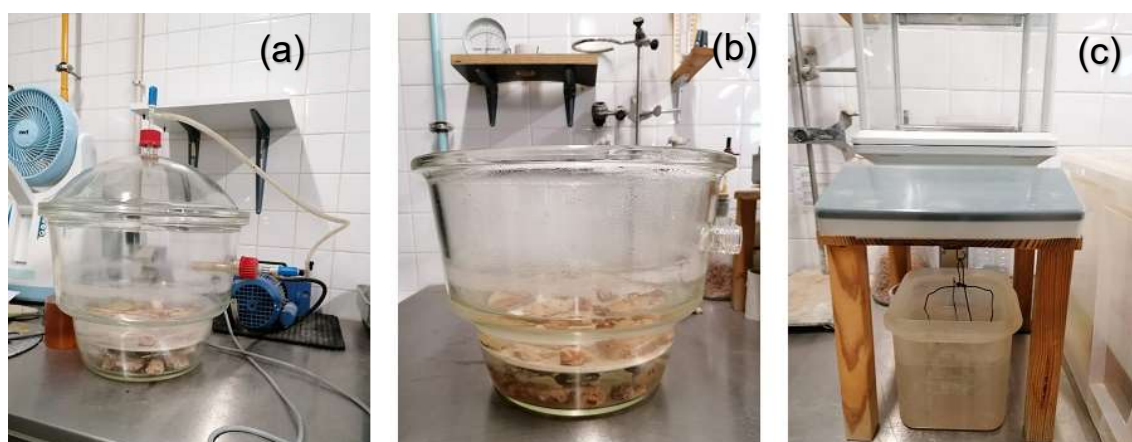


Figura 4.8. Exsiccador ligado à bomba de vácuo (a), amostras imersas em água (b) e pesagem hidrostática (c).

Para a determinação da porosidade aberta (P_{ab}) efetuou-se a razão (de forma percentual) entre o volume de poros abertos e o volume aparente do provete, através da equação 4.1:

$$P_{ab} = \frac{m_s - m}{m_s - m_h} \times 100 \quad \text{Equação 4.1}$$

A massa volúmica aparente (em kg/m^3) obteve-se através da razão entre a massa do provete seco e o seu volume aparente, e seu produto pela massa específica da água (ρ_{rh} em kg/m^3) que para 23°C corresponde a $997,57 \text{ kg/m}^3$, através da equação 4.2:

$$\rho_b = \frac{m_d}{m_s - m_h} \times \rho_{rh} \quad \text{Equação 4.2}$$

A massa volúmica real (em kg/m^3) foi obtida através da equação 4.3:

$$\rho_r = \frac{m_d}{m_d - m_h} \times \rho_{rh} \quad \text{Equação 4.3}$$

4.3.5 Módulo de elasticidade dinâmico

O ensaio do módulo de elasticidade dinâmico foi realizado por frequência de ressonância com base na norma NP EN 14146 (IPQ, 2006). O ensaio consiste em obter a frequência de ressonância longitudinal obtida através da transmissão de vibração entre um emissor um receptor. Para realização do ensaio foi utilizado o aparelho *Zeus Ressonance Meter*, Figura 4.9.



Figura 4.9. Ensaio módulo de elasticidade por frequência de ressonância no aparelho *Zeus Ressonance Meter*.

Insere-se no software de cálculo associado ao equipamento a massa e as dimensões de cada provete. Os provetes foram colocados no suporte do aparelho, entre o emissor e o receptor, em diversas posições. Assim, o software de cálculo determina, através da equação 4.4, o valor do módulo de elasticidade dinâmico em MPa.

$$E_d = (2 \times l \times f_o)^2 \times \frac{\rho}{g} \times 10^{-6} \quad \text{Equação 4.4}$$

Na equação, l é o comprimento do provete em m, f_o é a frequência de ressonância longitudinal em Hz, ρ é a massa volúmica em N/m^3 e g é a aceleração da gravidade com o valor de $9,8 \text{ m/s}^2$. O valor do módulo de elasticidade dinâmico de cada provete é a média aritmética dos valores medidos.

4.3.6 Velocidade de propagação de ultrassons

O ensaio de velocidade de propagação de ultrassons foi realizado de acordo com a ficha de ensaio FE Pa 43 (LNEC, 2015b). Este ensaio foi realizado de forma indireta ao longo da mesma face do reboco. Este ensaio tem o objetivo de avaliar a compacidade e a porosidade do material. Para a realização do ensaio foi necessário o auxílio do aparelho Pundit Lab (Proceq), figura 4.10a. O aparelho possui dois transdutores de 54 Hz, um para emitir o impulso e outro para receber o impulso.

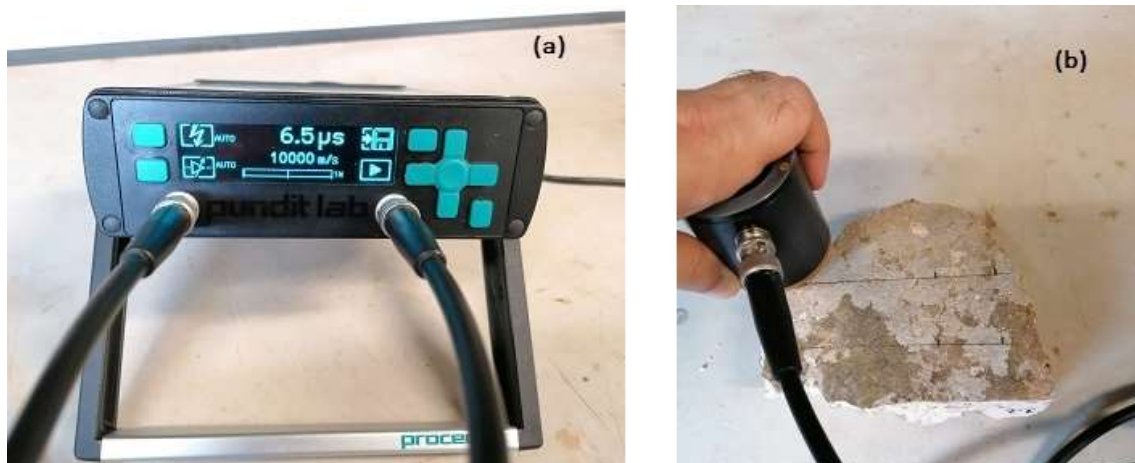


Figura 4.10. Aparelho Pundit Lab (Proceq) (a) e amostra em ensaio(b).

O ensaio foi feito pelo método indireto, em que foi posicionado o transdutor receptor no ponto considerado como inicial e o transdutor emissor foi sendo colocando nos pontos variando as distâncias. As distâncias foram definidas a partir da dimensão máxima da amostra. Foram traçadas duas linhas com o primeiro ponto a 7cm de distância do ponto inicial e o segundo ponto ficou a 10 cm do ponto inicial, Figura

4.10b. Para amostras menores foram traçadas duas linhas com dois pontos a 7 cm de distância do ponto inicial. Para cada ponto foram efetuadas três medições em todas as amostras.

O quociente entre a distâncias dos transdutores e o tempo que a onda demora para percorrer esta distância é a velocidade de propagação de ultrassons, expressa em m/s. A velocidade de propagação de ultrassons está diretamente ligada à compacidade do material; quanto menor o valor da velocidade, menor será a compacidade. O valor da velocidade de propagação de ultrassons está inversamente ligado ao volume de vazios do material; quanto menor o valor da velocidade, maior será o volume de vazios.

4.3.7 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado de acordo com a norma EN 15801 (CEN, 2009). Foi escolhida a face mais plana de cada amostra para ser colocada em contato com água, para que a absorção de água seja uniforme em toda área. Nas amostras irregulares a área de contato com a água foi calculada delimitando as amostras numa folha de papel, fotografado com uma régua graduada, exportada para o software AutoCAD e determinada a área de superfície de cada amostra. As amostras foram inseridas em tabuleiros com fundo coberto com uma rede, em seguida colocados em caixas de polipropileno estanque, Figura 4.11a, com ambiente saturado em humidade. Os tabuleiros foram nivelados com uma lâmina de água de aproximadamente 3 mm de altura, que foi sendo repostas para que a lâmina de água permanecesse com a altura inicial. O ensaio foi realizado em uma sala com humidade relativa e temperaturas controladas e constantes, $T = 20 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e $HR = 65 \pm 5 \%$.

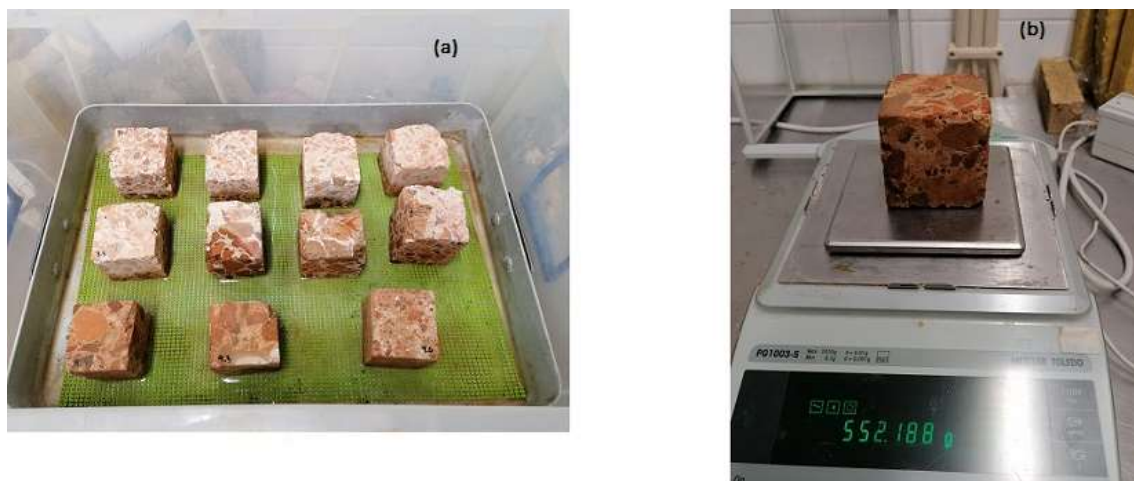


Figura 4.11. Tabuleiro com provetes sobre rede e em contacto com a lâmina de água (a) e pesagem do provete (b).

Para cada pesagem utilizou-se uma balança de precisão de 0,001 g. Pegou-se cuidadosamente a amostra, pousou-se num pano húmido sobre a bancada para retirar o excesso da água da base da amostra durante aproximadamente 2 segundos, Figura 4.11b. As medições foram realizadas de 5 em 5 minutos nos primeiros 15 minutos, em seguida foram realizadas aos 30, 60, 120, 180, 240, 300, 360 minutos, a partir daí a cada 24h até pesagem constante.

A quantidade de água absorvida no instante i , Q_i , medida em kg/m^2 , foi determinada pela equação 4.5.

$$Q_i = \frac{m_i - m_o}{A} \quad \text{Equação 4.5}$$

Na equação, m_i é a massa, em kg, da amostra ao final do instante i , m_o é a massa, em kg, da amostra seca, A é a área, em m^2 , da face do provete em contato com a água.

A partir da quantidade de massa absorvida por capilaridade pode-se traçar a curva de absorção capilar. No eixo das abcissas coloca-se a raiz do tempo em minutos e no eixo das ordenadas coloca-se o valor da quantidade de massa absorvida. Assim é possível calcular o coeficiente de absorção capilar (C_c), em $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$, que corresponde ao declive do segmento de reta mais representativo na fase inicial do ensaio de cada amostra. Entre os provetes com o mesmo volume pode-se comparar também o valor máximo de água absorvida, correspondente ao valor assintótico da curva de capilaridade.

4.3.8 Secagem

Após a conclusão do ensaio de absorção de água por capilaridade dá-se sequência ao ensaio de secagem. O ensaio de secagem foi realizado de acordo com a norma EN 16322 (CEN, 2013b). O ensaio foi realizado em uma sala com humidade relativa e temperaturas controladas e constantes, $T = 20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ e $HR = 65 \pm 5 \%$. Os provetes saturados do ensaio de capilaridade foram colocados sob bancada estanque, ver Figura 4.12, em posição inversa à do ensaio de capilaridade, ou seja, a face do provete que esteve em contato com a água foi colocada voltada para cima, de maneira que a água que foi absorvida seja evaporada maioritariamente por esta superfície. A água também evaporou pelas faces laterais, visto que estas faces não foram impermeabilizadas. No caso dos provetes cúbicos as áreas laterais foram consideradas na área de secagem; no caso dos provetes de reboco estas áreas não foram contabilizadas.

Os provetes foram pesados, com auxílio da mesma balança do ensaio de capilaridade com precisão de 0,001 g, ao fim de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, a partir daí foram feitas pesagens a cada 24 h até aos provetes apresentarem massa constante.

A perda de água dos provetes ao longo de um tempo é o resultado do ensaio de secagem. Em dois tipos de gráficos, os resultados das curvas de secagem, com a quantidade de água perdida por unidade de área em kg/m^2 no eixo das ordenadas, é possível observar as fases distintas de secagem. Para a primeira fase, calcula-se a taxa de secagem da fase 1 (TS1), a partir do declive negativo do troço reto inicial da curva

com o tempo, em h, em abcissas. Para a segunda fase, calcula-se a taxa de secagem da fase 2 (TS2), a partir do declive negativo do troço reto da zona intermédia da curva com raiz quadrada do tempo, em $h^{1/2}$, em abcissas.



Figura 4.12. Provets durante o ensaio de secagem

A taxa de secagem na fase 1 (TS1) traduz maioritariamente o deslocamento da água em estado líquido do interior do provete até a superfície. A taxa de secagem na fase 2 (TS2) corresponde maioritariamente ao fenómeno de difusão de vapor de água.

4.3.9 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado com base na norma EN 1015-11(CEN, 1999), mas com adaptações baseadas na ficha de ensaio FE Pa 42 (LNEC, 2015a). Este ensaio tem a finalidade de avaliar a capacidade de resistência do material ao carregamento vertical. Por ser um ensaio destrutivo foi deixado para o final da campanha experimental de ensaios físicos e mecânicos, os pedaços dos provetes após a realização do ensaio serão utilizados para o ensaio de porosidade aberta e massa volúmica aparente e real.

Existiram quatro provetes de reboco que foi necessária a aplicação de uma argamassa de confinamento de cimento possuindo traço 1:3, com a finalidade de regularização da face do provete, figura 4.13a.



Figura 4.13. Provete de reboco com argamassa de confinamento (a) e equipamento ZWICK Z050 em ensaio de compressão (b).

Para a realização do ensaio de compressão foi utilizado o equipamento ZWICK Z050, figura 4.13b, com uma célula de carga de 50 kN e uma velocidade de 3 mm/min até os provetes atingirem a rotura. O programa de cálculo associado ao equipamento efetuou o registo gráfico em que relaciona o tempo, em segundos (s), com a força aplicada, em Newton (N), sendo que o valor máximo da força de compressão corresponde ao pico no gráfico.

O valor da resistência à compressão R_c , em N/mm^2 , foi determinado através do quociente entre o valor da força máxima F_c , em N, pela área comprimida, A , em m^2 .

4.3.10 Tipo e máxima dimensão dos agregados

Com base no material resultante dos provetes submetidos ao ensaio de compressão e aos pedaços de material sobrando do corte dos provetes foi possível avaliar o tipo e máximas dimensões dos agregados utilizados nas diferentes amostras, nomeadamente das de betão. Os resultados deste ensaio serão apresentados em conjunto com os resultados da análise granulométrica após ataque de ácido, que possibilita complementar com resultados de agregados de menor dimensão.

4.4 Campanha experimental dos ensaios químicos e mineralógicos em laboratório

4.4.1 Preparação das amostras

Para esta fase de ensaios experimentais, nomeadamente químicos e mineralógicos, foi necessária a preparação de provetes para os diferentes tipos de ensaios a serem realizados.

Primeiro foram feitas as preparações para os ensaios de difração de raio X (DRX), análise termogravimétrica e térmica diferencial (ATG/ATD) e determinação do resíduo insolúvel em ácido (RI). Foi necessária a separação das amostras em duas frações distintas: fração fina e fração global. Para a preparação da fração fina foram utilizados um martelo de borracha e plástico, Figura 4.14a, martelo de metal, escopro, espátula e um peneiro com abertura de malha de 106 μm (ASTM C136/C136M, 2014). Com muito cuidado é feita a desagregação com auxílio do martelo de plástico e borracha para separar a pasta do ligante dos agregados através de suaves pancadas, movimentos de rotação, pressão e fricção, de modo a não quebrar o material agregado e aproveitar o material ligante. A seguir, o material é passado pelo peneiro com abertura de malha de 106 μm . Cerca de 2 g do material então é guardado em pequenos sacos plásticos identificados; o restante material que ficou retido na peneira também foi guardado em pequenos sacos plásticos identificados.

Na preparação para obtenção da fração global foram utilizados martelo de metal, almofariz de porcelana e uma peneira com abertura de malha de 106 μm , Figura 4.14b. Com o martelo de metal quebra-se a amostra em fragmentos pequenos; em seguida, o material é moído em almofariz de porcelana e passado na peneira com abertura de malha de 106 μm . O material que ficou retido na peneira é novamente moído no almofariz de porcelana e passado na peneira com abertura de malha de 106 μm . Ao final, cerca de 10 g de fração global é guardada em pequenos sacos plásticos identificados.

De maneira a prevenir a contaminação entre amostras, os equipamentos eram lavados e higienizados entre as preparações das diferentes amostras.

Para as preparações para a análise granulométrica, foi necessário realizar a desagregação das amostras, com a utilização de martelo de borracha e plástico, escopro e espátula. A seguir o material foi guardado em pequenos sacos plásticos identificados.



Figura 4.14. Martelo de plástico e borracha (a), peneiro com abertura de malha de 106 μm e almofariz (b).

4.4.2 Análise mineralógica por difração de raios X (DRX)

A análise mineralógica por difração de raios X (RDX) é uma técnica utilizada na caracterização de argamassas antigas. A análise por difração de raios X é utilizada para detecção da presença de determinados materiais na composição da amostra e permite obter informações muito significativas quanto à natureza do ligante e agregados quanto à presença de materiais pozolânicos, bem como de produtos de alteração (Chiari et al., 1996 citado por Almeida, 2015).

O princípio teórico da difração de raios X foi definido por W. L. Bragg em 1912. Os átomos dispostos numa rede tridimensional, com distâncias reticulares da mesma ordem de grandeza dos comprimentos de onda da radiação X, permitem que um cristal funcione como uma rede de difração de raios X. Um feixe monocromático de raios X incidindo sobre os planos reticulares dos cristais sofre difração sempre que se verifique a lei de Bragg, como na equação 4.6

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad \text{Equação 4.6}$$

Na equação 4.6 n é um número inteiro designado ordens dos raios difratados, λ é o comprimento de onda do raio X, d , em Å, é a distância interplanar entre planos cristalinos que depende de cada substância, e θ , em °, corresponde ao ângulo de incidência do feixe de radiação.

Para a realização do ensaio de difração de raios X utilizaram-se as frações finas e as frações globais, que permitiram indicar a composição mineralógica do ligante e agregado que compõem as amostras. Para os dois tipos de fração a preparação para o ensaio foi a mesma: selecionou-se uma porção da fração de forma a preencher o porta-amostras. Este preenchimento foi realizado cuidadosamente, depositando-se pequenas porções da fração a analisar. Com o auxílio de uma lâmina foi-se raspando a superfície e redistribuindo excessos com o objetivo de obter uma pastilha de amostra o mais compacta, coesa e preenchida possível, Figura 4.15a. Terminada a preparação da pastilha de amostra, colocou-se o porta-amostras no difractor D8 Discover, Figura 4.15b, com 40 kV e 40 mA de radiação, utilizou-se radiação CuK α com comprimento de onda $\lambda = 1,5406$ Å.

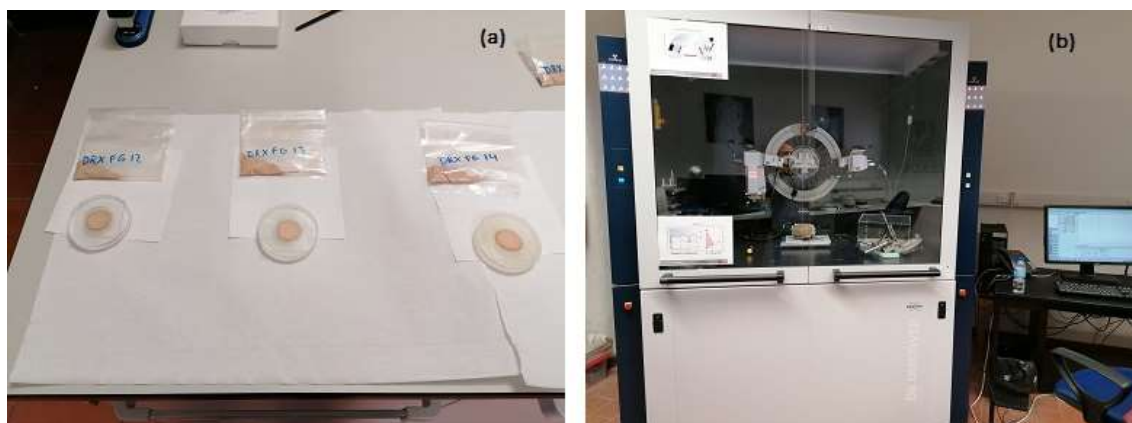


Figura 4.15. Porta-amostras preenchidas (a) Equipamento D8 Discover (b).

4.4.3 Análise termogravimétrica e térmica diferencial (ATG/dTG/ATD)

A análise termogravimétrica (ATG) é uma técnica de análise que avalia as perdas ou ganhos de massa de uma determinada amostra ao longo do tempo, com o aumento da temperatura (ou diminuição da temperatura) a uma velocidade constante. Neste processo quando ocorre uma reação que causa uma perda de massa ou ganho de massa pode ser quantificada. As perdas de massa obtidas ocorrem, em intervalos de temperatura característicos da presença de um determinado composto. Uma variante da análise termogravimétrica é a sua derivada, que é representada em simultâneo, sendo designada de análise termogravimétrica diferencial (dTG).

A análise térmica diferencial (ATD) é uma outra técnica de análise térmica em que é registada a diferença de temperatura entre a amostra em análise e um material que não sofre qualquer transformação na gama de temperatura do ensaio.

Para a realização do ensaio foi utilizado o equipamento SETARAM TGA 92, Figura 4.16, usou-se a fração global preparada previamente como descrito em 4.3.1. Os termogramas das amostras foram efetuados sob atmosfera inerte (árgon – 3 L/h), com velocidade de aquecimento uniforme de 10° C/min, desde a temperatura ambiente até 1000 °C.

As perdas de massa registadas entre os 25 e 200 °C correspondem à perda de água livre (de humidade); a perda de massa entre os 200 e 550 °C correspondem à perda de água devida à desidroxilação dos minerais de argila e alguns compostos hidratados de ferro; por fim, a perda de massa entre os 550 e os 900 °C deve-se essencialmente à reação de descarbonatação dos carbonatos.

De maneira que a reação de descarbonatação acontece no intervalo de temperatura 550-900 °C, o teor de CaCO₃ pode ser calculado de acordo com a equação 4.7.

$$\text{Teor de CaCO}_3 = pm_{550-900} \times \frac{MM_{CaCO_3}}{MM_{CO_2}} \quad \text{Equação 4.7}$$

Sendo $pm_{550-900}$ corresponde à perda de massa no intervalo 550-900 °C e $\frac{MM_{CaCO_3}}{MM_{CO_2}}$ é a razão molar entre os compostos envolvidos na reação de descarbonatação do CaCO₃.



Figura 4.16. Equipamento SETARAM TGA 92

4.4.4 Determinação de resíduo insolúvel por ataque ácido (RI)

Para a realização do ensaio separa-se cerca de 3 a 4 g da fração global de cada amostra, anteriormente preparadas como descrito em 4.3.1, e colocam-se em estufa a 105 °C. Após a secagem, as amostras foram colocadas em frascos de vidro, hermeticamente fechados e identificados, de seguida todos os frascos foram colocados em um exsiccador com sílica, onde permaneceram até ao início do ensaio, Figura 4.17a. O ensaio foi realizado em duplicado em todas as amostras.

O ensaio iniciou-se com a pesagem numa balança de precisão de 0,0001 g, de aproximadamente 1 grama de cada amostra seca (c) colocada cuidadosamente com uma colher no interior de um copo de vidro de 400 mL alto (para evitar o transbordo de eventuais efervescências), previamente tarado. Após as pesagens, os copos foram tapados para garantir que não houvesse contaminações, Figura 4.17b.

Coloca-se os copos sobre as placas de agitação magnética, com auxílio de um pipetador bico de pato introduz 100 mL de água destilada ultrapura e adiciona-se essa água para o copo contendo a amostra. Introduz um agitador (barra magnética) no interior do copo e liga-se as placas de agitação magnética por 2 minutos de agitação. Com o auxílio de outro pipetador bico de pato introduz 40 mL de ácido nítrico HNO_3 (1:10) ao copo, seguindo-se a introdução de mais 60 mL de água destilada ultrapura. A agitação magnética, Figura 4.17c, durou 30 minutos, após os quais se desligaram as placas de agitação. Após ataque ácido das amostras, mediu-se o pH de cada solução com papel indicador de pH universal, figura 4.19d, para certificar que o ataque ácido teria sido bem efetuado. Por comparação com a escala, comprovou-se que todas as soluções apresentaram pH 1, o que indicou que o ataque com o ácido nítrico foi bem realizado.

Segunda etapa deste ensaio, consistiu num suporte com 8 frascos plásticos identificados sobre os quais se colocou um funil com um filtro de papel médio sem cinzas volantes, Figura 4.17e. Os agitadores que estavam dentro dos copos foram removidos por magnetismo. Com o auxílio de uma vareta de vidro encostada à parede do funil, realizou-se a decantação de cada solução. Terminado este processo, para garantir que não havia perda de resíduo, efetuaram-se várias lavagens com água destilada ultrapura.

Posteriormente, colocam-se cadinhos de porcelana a secar em estufa. Uma vez secos, foram calcinados numa mufla a 1000 °C, Figura 4.17f. Após calcinados foram colocados num exsicador onde ficaram a arrefecer. Quando arrefecidos, foram identificados e pesados individualmente, numa balança de precisão de 0,0001 g. Depois de pesados, foram cuidadosamente preenchidos com o conjunto filtro mais resíduos insolúveis da amostra correspondente. Colocou-se o cadinho preenchido em estufa para secar o resíduo e só depois na mufla. O aumento da temperatura foi gradual para que não ocorresse o incêndio do filtro. Terminado o processo de calcinação a 1000 °C, removeram-se os cadinhos, já contendo apenas o resíduo insolúvel, efetuou-se a pesagem desse resíduo (c_1) e procedeu-se ao cálculo da percentagem que este representou na amostra (%RI), de acordo com a equação 4.8.

$$RI = \frac{c_1 - c}{m} \times 100 \quad \text{Equação 4.8}$$

Sendo, RI (%) o resíduo insolúvel em percentagem, c_1 (g) massa do cadinho mais o resíduo insolúvel, c (g) massa do cadinho vazio e m (g) massa da amostra.



Figuras 4.17. Exsicador com amostras (a), copos tapados com amostras (b), agitação magnética (c), indicador de pH (d), funil com filtro de papel e frascos plásticos (e) e mufla a 1000 °C (f).

4.4.5 Análise granulométrica do agregado após ataque ácido

O ataque ácido foi realizado segundo procedimento interno do LNEC para argamassas antigas. O ensaio foi realizado na amostra desagregada, ou seja, as amostras submetidas a este ensaio foram preparadas com o cuidado e o objetivo de não partir os agregados. Antes ao ataque, as amostras foram colocadas em recipientes de vidro para serem secas em estufa a uma temperatura de 105 °C durante pelo menos 12 h, foram também preparados cadinhos de Gooch para a filtragem, sendo estes também colocados em estufa nas mesmas condições que os recipientes de vidro.

O ataque da amostra desagregada dentro de um copo de vidro ocorreu adicionando água destilada quente para humedecer a amostras, agitando simultaneamente para evitar a formação de grânulos. Foi adicionado muito lentamente 120 mL de ácido clorídrico HCL (1:3), esperou-se 5 minutos e agitou-se vigorosamente com auxílio de uma vareta de vidro, Figura 4.18a. Após cessar toda liberação de CO₂, foi aquecida a uma temperatura entre 150 e 200 °C por um período de 15 minutos e deixou-se sedimentar.

Após ataque, procedeu-se à filtragem do resíduo usando cadinhos de Gooch previamente pesados e identificados, com recurso a uma bomba de vácuo, Figura 4.18b. A amostra foi lavada por decantação com água destilada quente, todo o resíduo foi transferido para o cadinho que foi lavado com água destilada quente até eliminação dos cloretos, este processo foi verificado medindo o pH com papel indicador de pH universal.

Posteriormente a filtragem o cadinho com o resíduo foi levado a estufa com temperatura de 105 °C para secar, pesados até obter massa constante. Efetuou-se a separação granulométrica, durante 10 minutos, com recurso a um equipamento de agitação de peneiros da marca RETSCH, Figura 4.18c, com uma coluna de peneiros da série ASTM indicada na Tabela 4.6.

Tabela 4.6. Série ASTM de peneiros utilizados para a separação granulométrica

Nº do peneiro	Abertura de malha (mm)
4	4,75
8	2,36
16	1,18
30	0,6
50	0,3
100	0,15
200	0,075



Figura 4.18. Ataque ácido (a), filtragem do resíduo usando cadinhos de Gooch com recurso a uma bomba de vácuo (b) e peneiros da série ASTM em agitador (c).

5. Resultados e discussão

5.1 Considerações gerais

Neste capítulo são apresentados e analisados todos os resultados obtidos durante os ensaios realizados in situ, ensaios físicos e mecânicos, e ensaios químicos e mineralógicos. Os resultados são correlacionados e comparados com resultados encontrados na pesquisa bibliográfica.

Nos anexos A1 a A3 estão apresentadas tabelas com os resultados individuais dos ensaios realizado.

5.2 Resultado da caracterização in situ

Apresenta-se abaixo a Tabela 5.1 onde é possível se conhecer a quantidade do ensaios realizados em cada localidade.

Tabela 5.1. Tipos de ensaios, localização e números de ensaios.

Tipos de ensaios	Localização	Nº de ensaios
Impacto por choque de esfera	Cisterna norte	7
Esclerómetro pendular	Cisterna norte	34
	Tanque Of 14 poente	10
	Tanque Of 14 sul	26
	Frigidarium poente	17
	Frigidarium sul	6
Durómetro	Cisterna sul	32
	Cisterna norte	56
	Construção circular	16
	Tanque Of 14	13
	Frigidarium poente	24
	Frigidarium sul	19
Tubo de Karsten	Cisterna sul	1
	Cisterna norte	1
	Tanque Of 14	1

5.2.1 Impacto por choque de esfera

Os valores do diâmetro da concavidade resultante do impacto da esfera, foram obtidos no reboco da cisterna norte (RCN), tendo como resultados valores entre 11,85 e 14,74 mm, o valor médio 13,29 mm e o desvio padrão de 1,19 mm, sem ocorrência de fissuração pelo impacto. Veiga et al. (2009) avaliaram, por impacto por choque de esfera, painéis de reboco de argamassas de cal aérea e cal hidráulica numa fortaleza,

obtendo valores superiores, entre os 18 e 21 mm de diâmetro. Em comparação com os resultados obtidos, as argamassas da cisterna indiciam maior resistência em comparação com as da forteleza ensaiada por Veiga et al. (2009).

5.2.2 Resistência superficial por esclerômetro pendular

A realização do ensaio de resistência superficial por esclerômetro pendular permitiu obter resultados em cinco diferentes locais do sítio arqueológico do Creiro. Os resultados estão na Figura 5.1 e no Anexo A1.

Os valores para reboco da cisterna norte (RCN) variam entre os 31 a 82 graus Vickers, com valor médio de 62 e desvio padrão de 13 graus vickers, que a Tabela 4.2 classifica como Muito Boa resistência superficial. Os valores para o reboco no tanque da Oficina F14 poente (RTF14P) variam entre 29 a 54 graus Vickers, com valor médio de 40 e desvio padrão de 8 graus vickers, que a Tabela 4.2 classifica como Boa resistência superficial. Os valores para o reboco no tanque da Oficina F14 sul (RTF14S) variam entre 24 a 70 graus Vickers, com valor médio de 46 e desvio padrão de 14 graus vickers, que a Tabela 4.2 classifica como Boa resistência superficial. Os valores para o reboco no frigidarium poente (RFP) variam entre 33 a 97 graus Vickers, com valor médio de 62 e o desvio padrão de 23 graus vickers, que a Tabela 4.2 classifica como Muito Boa resistência superficial. Os valores para o reboco no frigidarium sul (RFS) variam entre 21 a 48 graus Vickers, com valor médio de 34 e o desvio padrão de 9 graus vickers, que a Tabela 4.2 classifica como Suficiente resistência superficial.

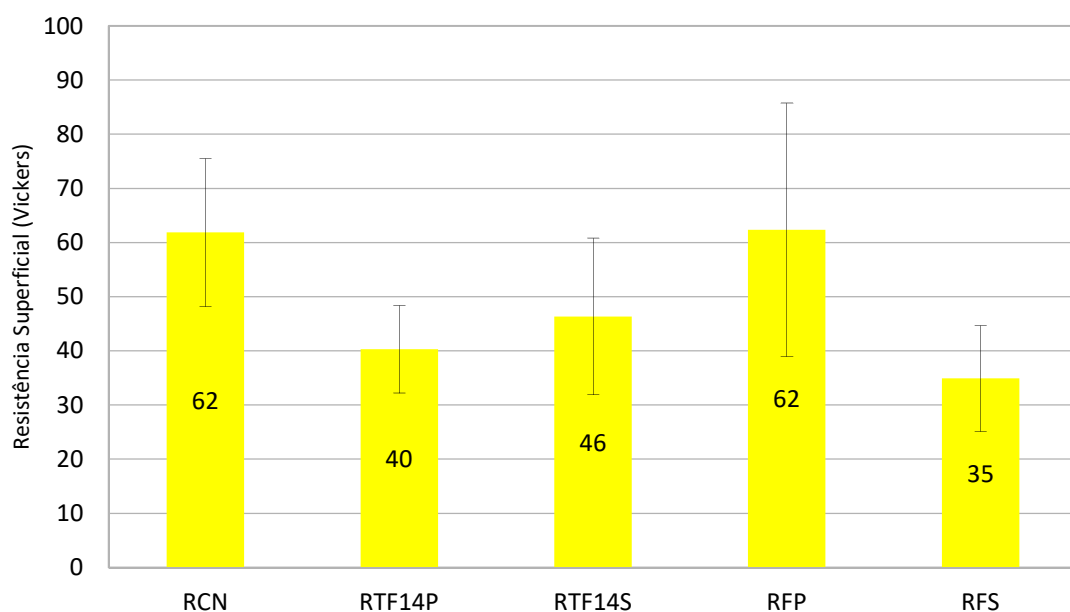


Figura 5.1. Valores da resistência superficial por esclerômetro obtidos nos rebocos da cisterna norte, tanque da oficina F14 lados poente e sul e frigidarium lados poente e sul.

Por não se encontrarem outros resultados de estudos anteriores com ensaios realizados in situ, para o mesmo tipo de material que este estudo, decidiu-se compará-los com muros de taipa. Comparando com os resultados obtidos por Faria et al. (2014) de 87 ± 6 graus Vicker obtidos para muros de taipa corrente, verifica-se que os resultados do sítio arqueológico do Creiro são inferiores. Mas mesmo com resultados inferiores estes são considerados pela Tabela 4.2 como boa resistência superficial, com exceção do reboco do frigidarium sul (RFS) que apresentou resultado de resistência superficial suficiente.

5.2.3 Resistência superficial por durômetro

A realização do ensaio de resistência superficial por durômetro permitiu obter resultados em seis diferentes locais do sítio arqueológico do Creiro. Os resultados estão na Figura 5.2 e no Anexo A1.

Os valores para reboco da cisterna norte (RCN) variam entre os 66 a 97 Shore A, com valor médio de 84 e desvio padrão de 6 Shore A. Os valores para reboco da cisterna sul (RCS) variam entre os 53 a 92 Shore A, com valor médio de 81 e desvio padrão de 9 Shore A. Os valores para reboco da entrada da construção circular (RCC) variam entre os 66 a 95 Shore A, com valor médio de 83 e desvio padrão de 9 Shore A. Os valores para reboco do tanque da Oficina F14 (RTF14) variam entre 64 a 91 Shore A, com valor médio de 78 e desvio padrão de 9 Shore A. Os valores para o reboco do frigidarium poente (RFP) variam entre 72 a 90 Shore A, com valor médio de 81 e desvio padrão de 5 Shore A. Os valores para o reboco do frigidarium sul (RFS) variam entre 68 a 93 Shore A, com valor médio de 78 e desvio padrão de 7 Shore A.

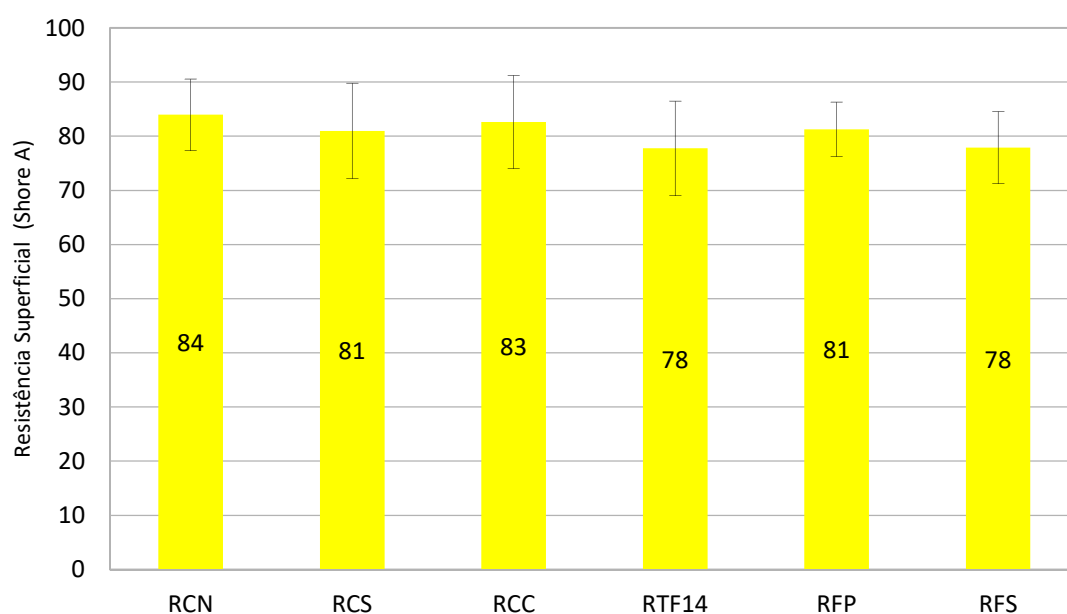


Figura 5.2. Valores da resistência superficial por durômetro obtidos no reboco da cisterna lados norte e sul, entrada da construção circular, tanque da Oficina 14 e frigidarium, lados poente e sul.

5.2.4 Absorção de água sob pressão por tubos de Karsten

O ensaio de absorção de água sob baixa pressão por tubos de Karsten foi realizado em três locais do sítio arqueológico do Creiro.

Na parede da cisterna norte (RCN), registou-se absorção nula, nos três tubos, após 30 minutos de execução do ensaio. Esta situação revela que o reboco, completamente estanque, bloqueou a entrada de água.

Na parede da cisterna sul (RCS), registou-se absorção nula, nos três tubos, após 30 minutos de execução do ensaio. Esta situação revela que o reboco, completamente estanque, bloqueou a entrada de água.

No tanque da Oficina F14 (RTF14), o tubo 2 apresentou absorção de 0,5 ml após 5 minutos de execução do ensaio e a absorção de água permaneceu inalterada até a conclusão do ensaio. No entanto, os tubos 1 e 3 não registaram absorção após 30 min de execução do ensaio. Esta situação sugere que o local de aplicação do tubo 2 possuía microfissuras, que não foi possível visualizar na aplicação do tubo, que absorveu a quantidade de água até a saturação da microfissura. Então, essa situação revela que o reboco bloqueou a entrada de água.

5.3 Resultados dos ensaios físicos-mecânicos realizados em laboratório

5.3.1 Resistência superficial por durômetro

Em laboratório foi avaliada a resistência superficial por durômetro em todos os provetes referidos na Tabela 4.4. Nos provetes cúbicos de betão foram feitas seis medições para se ter uma avaliação mais abrangente da dureza superficial. Nos provetes de reboco foram feitas no mínimo de três medições nos provetes menores até seis medições nos provetes maiores.

Na Figura 5.3 apresentam os valores médios da dureza superficial apenas nos rebocos e a Figura 5.4 apresentam os valores médios da dureza superficial apenas nos betões.

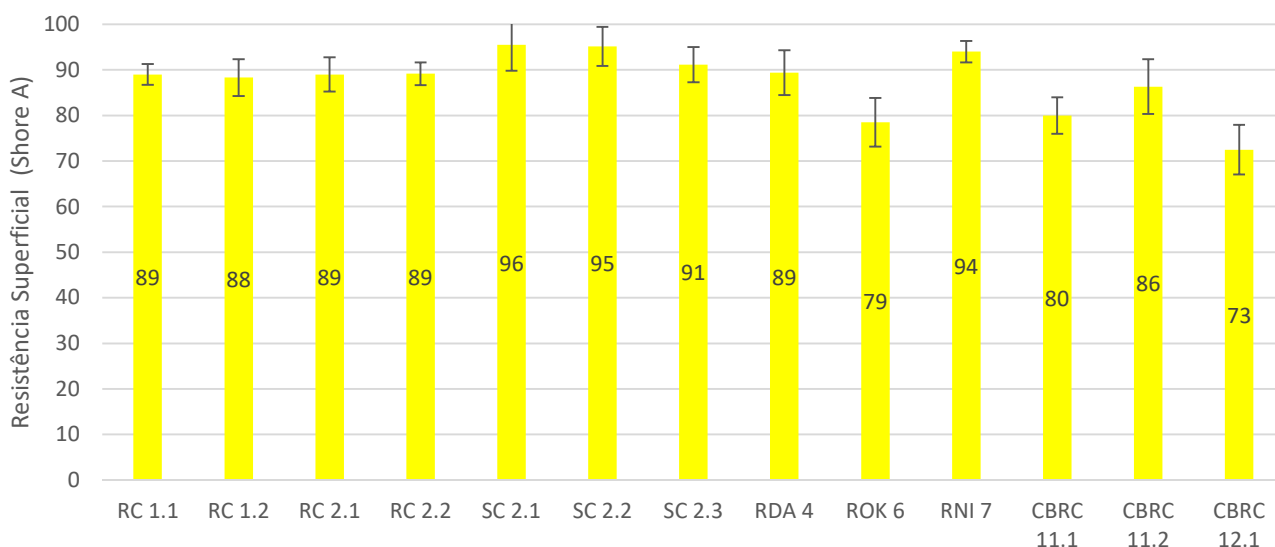


Figura 5.3. Valores de resistência superficial por durômetro dos rebocos.

Na Figura 5.3, verifica-se que os valores médios entre os provetes de reboco ficaram entre 73 a 96 Shore A e com desvio padrão ficando entre 2,3 e 6,0 Shore A. Na Figura 5.4, verifica-se que os valores médios entre os provetes de betões ficaram entre 93 a 98 Shore A e com desvio padrão ficando entre 0,8 e 4,7 Shore A.

O limite da escala do durômetro é 100, valores muito perto desse limite apresentam pouca confiança. Analisando detalhadamente esses valores, identifica-se o provete de reboco SC 2.1, retirado do suporte de reboco da cisterna, como o que apresenta maior valor de dureza e, no sentido oposto, o provete de reboco CBRC 12.1, retirado da camada de base do reboco da constrição circular, como o que apresenta o menor valor de dureza.

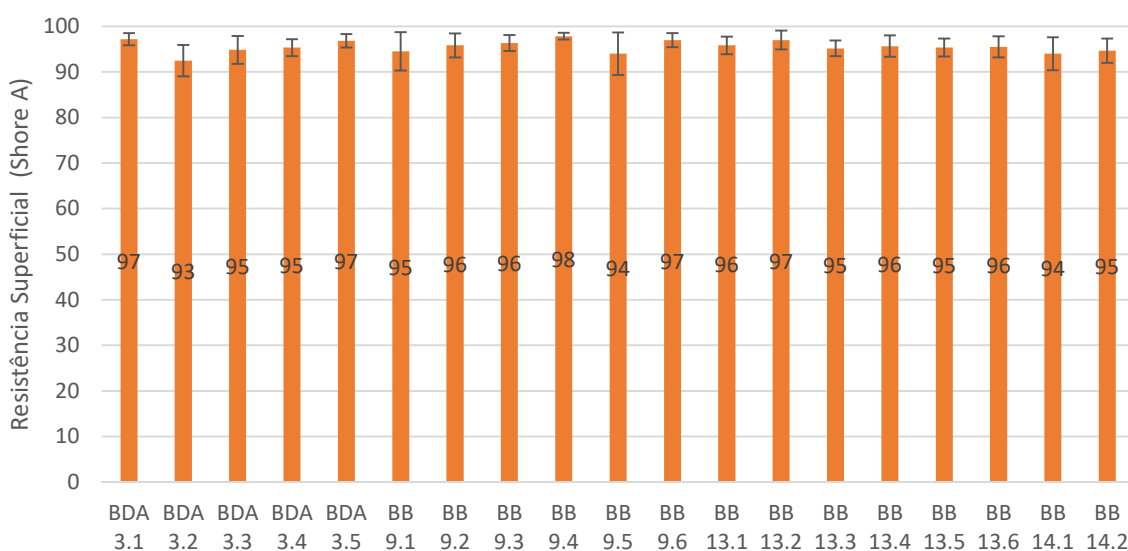


Figura 5.4. Valores da resistência superficial por durômetro dos betões.

Analisando detalhadamente esses valores para os betões o provete BB 9.4, retirado do balneário, como o que apresenta o maior valor de dureza, e no sentido oposto, o provete BDA 3.2, retirado do depósito de água, como o que apresenta o menor valor de dureza.

Comparando os resultados do ensaio de resistência superficial por durômetro realizado in situ com os resultados do ensaio realizados em laboratório em provetes de reboco percebe-se que os valores in situ foram menores, com a média variando entre 78 a 84 Shore A enquanto que os valores do laboratório a média variando entre 73 a 96 Shore A.

5.3.2 Massa volúmica

O valor da massa volúmica dos 9 provetes indicados na Tabela 4.5 estão apresentados na Figura 5.5. Foram determinados pelo método geométrico e não apresentam grandes diferenças entre si. O provete SC 2.2 é o que apresenta o valor mais elevado, sendo ele da camada de base do reboco da cisterna. Os provetes de betão apresentam valores de ordem de grandeza muito semelhante entre si, e o menor valor apresentado é do provete BB 14.1.

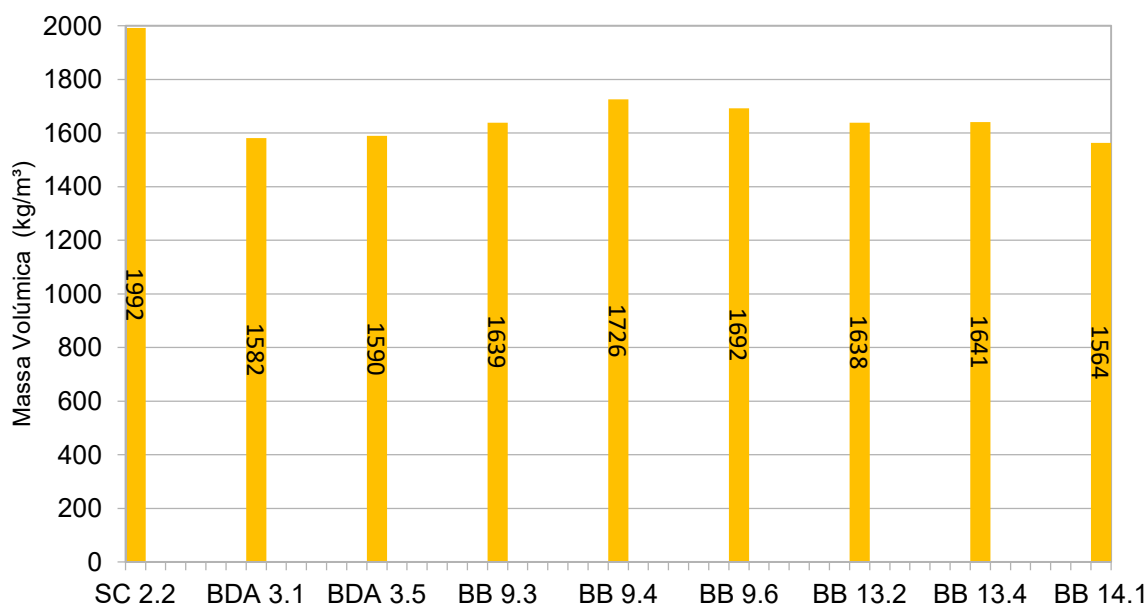


Figura 5.5. Valores de massa volúmica pelo método geométrico dos provetes cúbicos.

5.3.3 Porosidade aberta, massa volúmica aparente e massa volúmica real

Os valores médios da porosidade aberta, massa volúmica aparente e real das amostras analisadas estão apresentados nas Figuras 5.6, Figura 5.7 e Figura 5.8. Os valores individuais estão apresentados no Anexo A2.

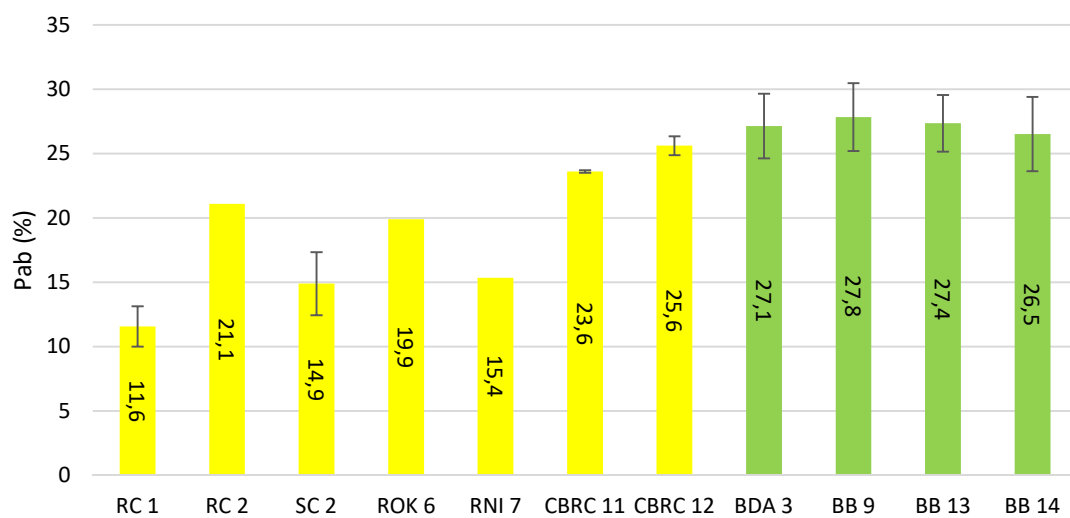


Figura 5.6. Valores de porosidade aberta de provetes de reboco (amarelo) e provetes de betão (verde).

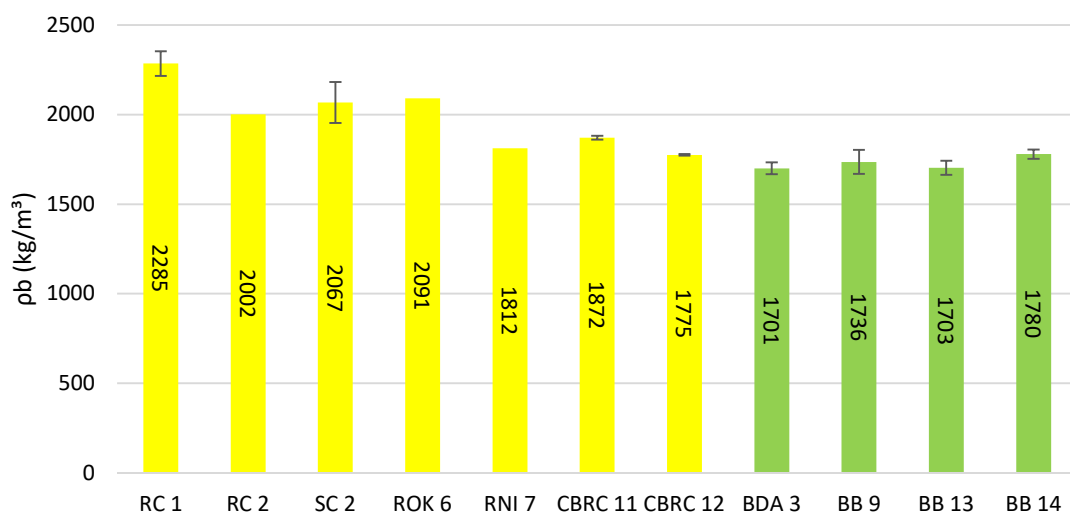


Figura 5.7. Valores de massa volúmica aparente de provetes de reboco (amarelo) e provetes de betão (verde).

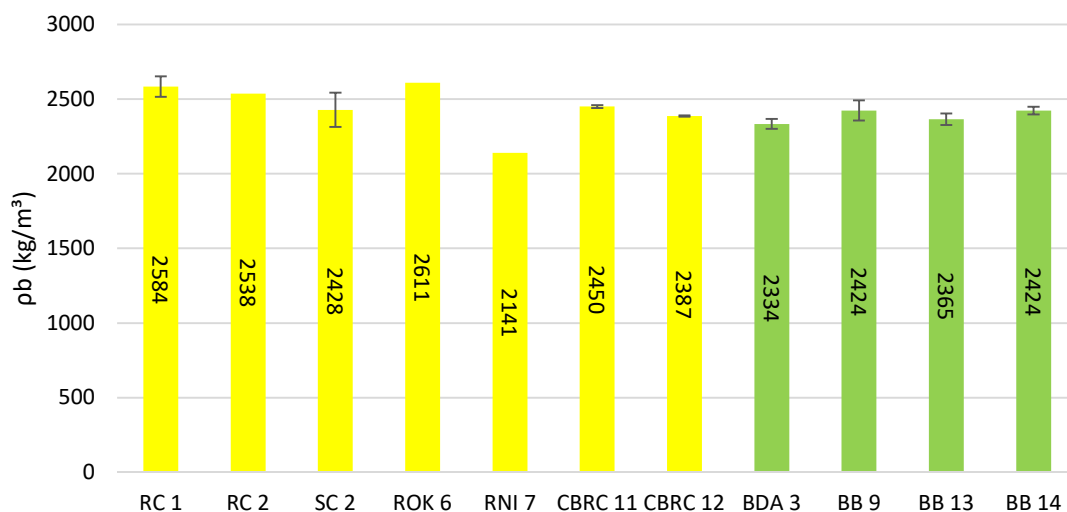


Figura 5.8. Valores de massa volúmica real de provetes de reboco (amarelo) e provetes de betão (verde).

Comparando a massa volúmica aparente das amostras com a massa volúmica pelo método geométrico, podemos observar que o provete SC 2.2 é o que possui o maior valor pelo método geométrico, de 1992 kg/m³, também possui o valor de 2148 kg/m³ no ensaio de massa volúmica aparente. Por outro lado o provete BB 14.2 é o que possuía o menor valor pelo método geométrico, de 1564 kg/m³, apresenta o valor de 1762 kg/m³ no ensaio de massa volúmica aparente. Um outro provete que ficou muito próximo os valores da massa volúmica pelo método geométrico e o valor da massa volúmica aparente foi o provete BB 9.4, que possuía 1726 kg/m³ pelo método geométrico e apresenta o valor de 1721 kg/m³ em massa volúmica aparente. Diante do exposto o método geométrico nos dá resultados válidos mas pouco precisos, então deve se utilizar outro método que nos apresente valores com maiores níveis de precisão.

Comparando os resultados da porosidade aberta com os obtidos por Damas et al. (2018) sintetizados na Tabela 2.3, na ordem de valores compreendidos entre 23,5% e 36% para amostras de argamassa de colagem de azulejos antigos, verifica-se que os do presente estudos estão menores na ordem de 11,6% a 27,8%.

5.3.4 Módulo de elasticidade dinâmico

Os resultados do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico avaliam a rigidez do material ou, pelo contrário, a sua capacidade para acompanhar deformações do suporte. Para o caso do módulo de elasticidade elevado resultará uma menor capacidade de deformação do material, e quanto menor, maior será a capacidade de deformação. Os resultados são apresentados na Figura 5.9 para provetes de quase cúbicos de betão.

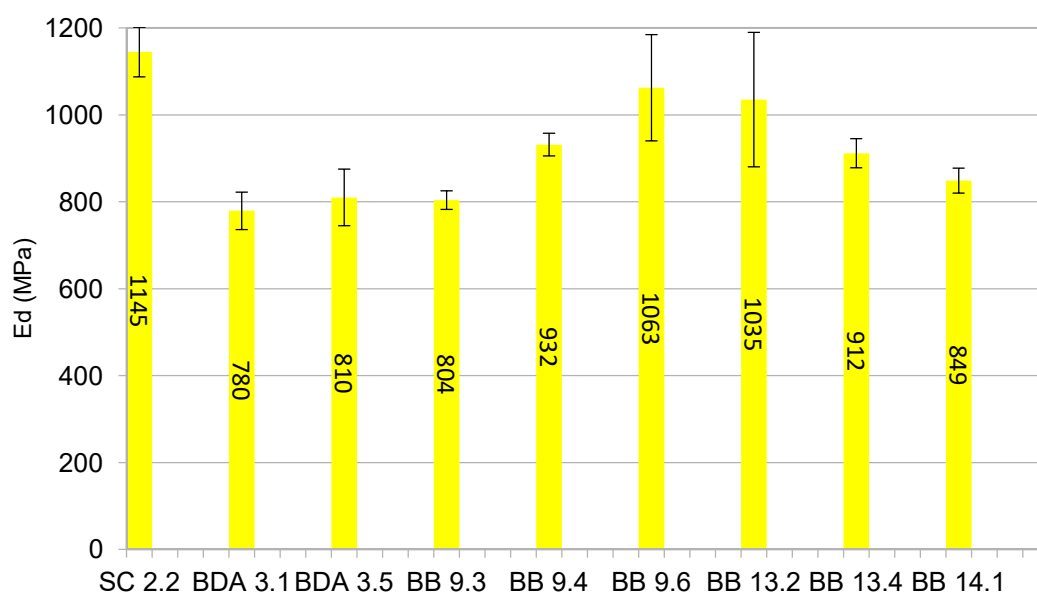


Figura 5.9. Valores do módulo de elasticidade dinâmico em provetes de betão.

Analisando os resultados, o provete SC 2.2 foi o que apresentou o maior módulo de elasticidade dinâmico com 1144,8 MPa, o que poderá indicar uma mais fácil fendilhação do material. Em sentido oposto, o provete com menor valor de módulo de elasticidade dinâmico foi o BDA 3.1 com 779,5 MPa.

Comparando os resultados do módulo de elasticidade dinâmico com os obtidos por Cotrim Coradinho (2018) para amostras de taipa, na ordem de valores compreendidos entre 250 e 475 MPa, verifica-se que os do presente estudo são bastantes superiores, indiciando uma menor capacidade de deformação.

Comparado os resultados do módulo de elasticidade com os obtidos por Almeida et al. (2017), sintetizados na Tabela 2.2 na ordem de valores compreendidos entre 170 MPa e 1325 Mpa para provetes de argamassas de cal, verifica-se que o valor mínimo do presente estudo, 780 Mpa, é bastante superior, mas o valor máximo do presente estudo 1145 MPa é inferior.

5.3.5 Velocidade de propagação de ultrassons

O valor da velocidade de propagação de ultrassons está inversamente ligado ao volume de vazios do material; quanto menor o valor da velocidade, maior será o volume de vazios ou eventual fendilhação existente.

Os valores obtidos do ensaio de propagação de ultrassons para os provetes de reboco encontram-se na Figura 5.10.

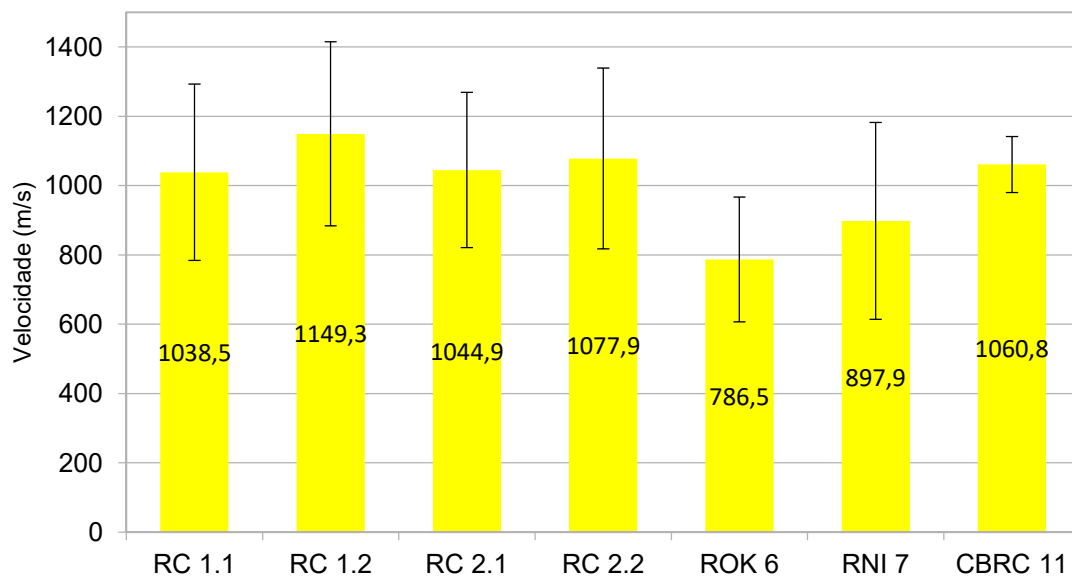


Figura 5.10. Valores de velocidade de propagação de ultrassons em provetes de reboco.

Analisando os resultados detalhadamente o provete que apresentou maior valor de velocidade de propagação foi o RC 2.1 com 1149,28 m/s. Este provete indicia apresentar o menor volume de vazios dentre os provetes ensaiados. Por outro lado, o provete ROK 6 com a menor velocidade de propagação de ultrassons com 786,52 m/s, indicia ter a estrutura mais porosa, com maior volume de vazios.

5.3.6 Absorção de água por capilaridade

As curvas de absorção de água por capilaridade são representadas nas Figura 5.11, Figura 5.12 e Figura 5.13 para os provetes de reboco, e nas Figura 5.14, Figura 5.15 e Figura 5.16, para os provetes de betão Romano. Quanto menor forem os coeficientes de absorção capilar, menor será a absorção de água inicial.

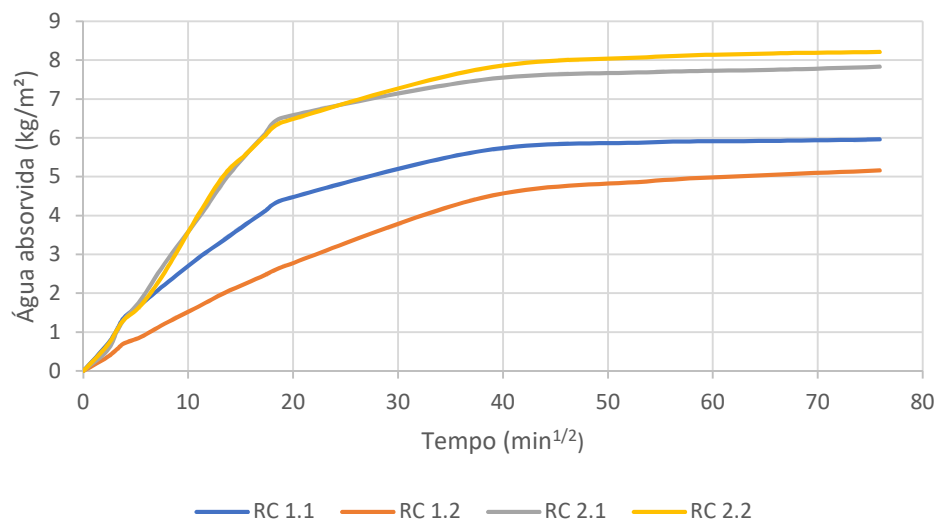


Figura 5.11. Curva de absorção de água por capilaridade de provetes de reboco retirados da cisterna.

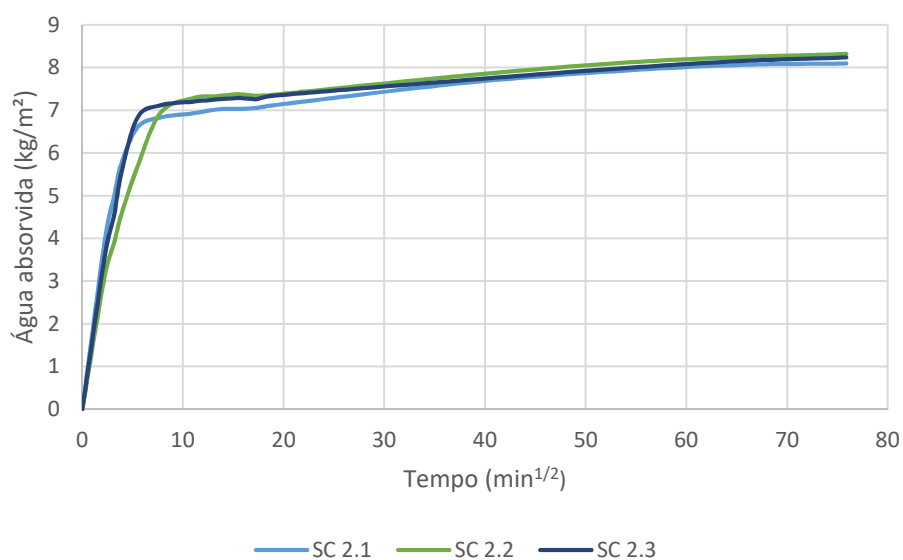


Figura 5.12. Curva de absorção de água por capilaridade de provetes retirados do suporte do reboco da cisterna.

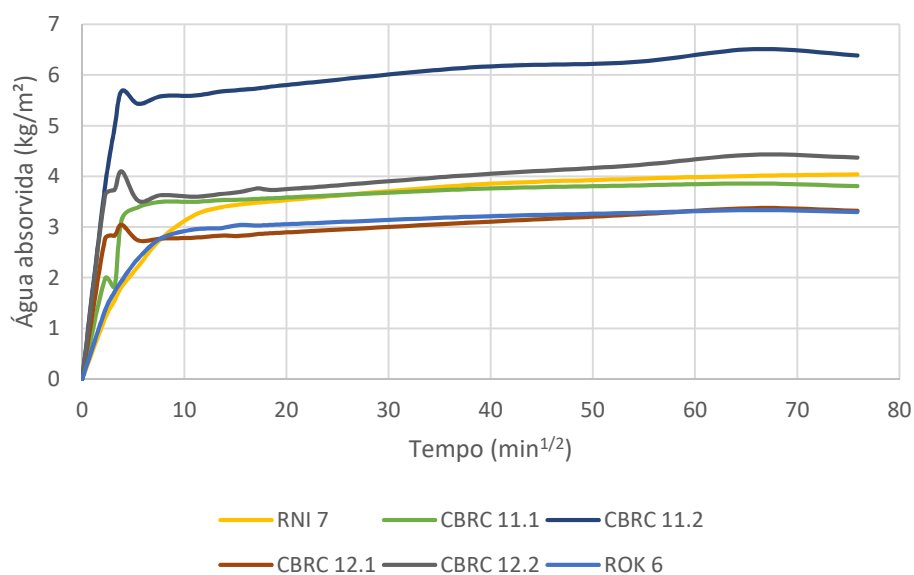


Figura 5.13. Curva de absorção de água por capilaridade de provetes de reboco retirados da camada de base da construção circular, oficina K10 e local não identificado.

Os coeficientes de absorção capilar C_c foram calculados através do declive do troço linear na fase inicial da curva de capilaridade e estão apresentados na Tabela 5.2. É possível verificar que o valor médio calculado foi de 0,23 a 1,60 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{1/2})$ para os provetes de reboco. O valor médio calculado para os provetes de betão foi de 1,00 a 2,06 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{1/2})$.

Tabela 5.2. Valores individuais e médios do coeficiente de capilaridade obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade.

Amostra	Proвете	Coeficiente de capilaridade $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{1/2})$	
		Individual	Média
RC 1	RC 1.1	0,30	0,23
	RC 1.2	0,16	
RC 2	RC 2.1	0,23	0,26
	RC 2.2	0,28	
SC 2	SC 2.1	1,77	1,6
	SC 2.2	1,41	
	SC 2.3	1,61	
ROK 6	ROK 6	0,61	0,61
RNI 7	RNI 7	0,53	0,53
CBRC 11	CBRC 11.1	0,89	1,29
	CBRC 11.2	1,70	
CBRC 12	CBRC 12.1	1,24	1,43
	CBRC 12.2	1,62	

Verifica-se o maior valor de C_c no provete SC 2.1 com $1,77 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{m}^{1/2})$. Por outro lado, o provete RC 1.2 apresenta o valor de C_c mais baixo de apenas $0,16 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{m}^{1/2})$. Os provetes de reboco da cisterna apresentaram os menores valores entre todos os provetes ensaiados. Já era esperado valores baixos para as amostras de reboco da cisterna (RC 1.1, RC 1.2, RC 2.1 e RC 2.2) devido ao resultado do ensaio de absorção de água sob pressão por tubos de Karsten, que não absorveu nenhuma água, resultando em uma parede completamente estanque a água.

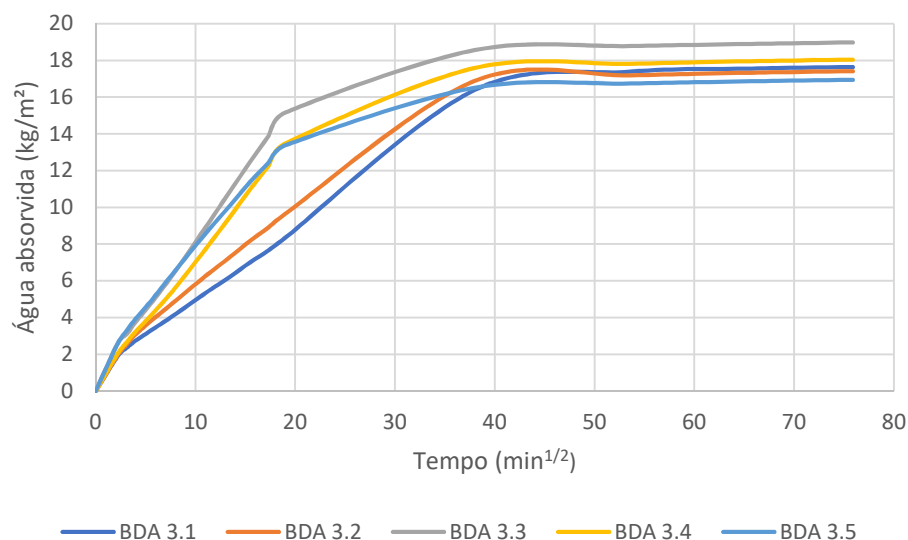


Figura 5.14. Curva de absorção de água por capilaridade em provetes de betão retirados do depósito de água.

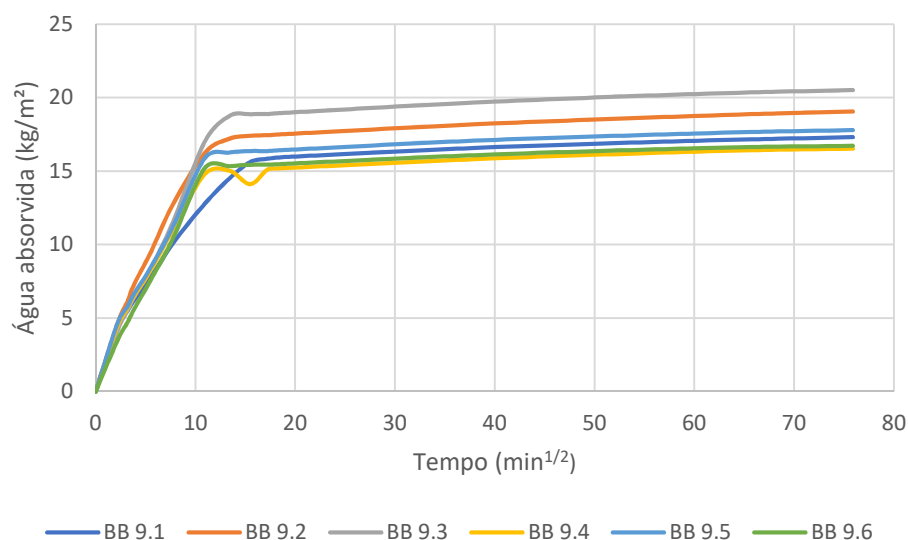


Figura 5.15. Curva de absorção de água por capilaridade em provetes de betão retirados do balneário amostra 9.

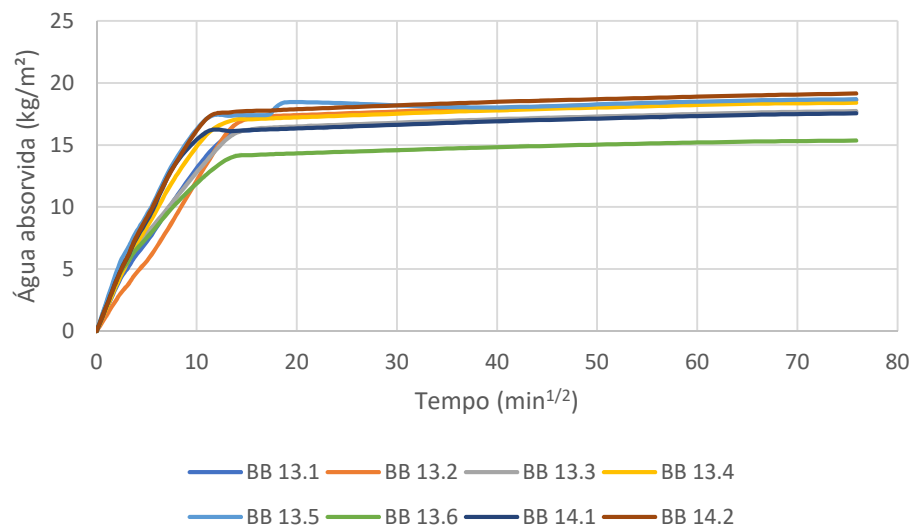


Figura 5.16. Curva de absorção de água por capilaridade em provetes de betão retirados do balneário amostras 13 e 14.

Os valores de coeficiente de capilaridade (C_c) apresentados na Tabela 5.3, calculados a partir das curvas de absorção capilar nos instantes iniciais das das Figura 5.11, Figura 5.12 e Figura 5.13, mostram que o valor médio calculado foi de 1,00 a 2,06 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{m}^{1/2})$ para os provetes de betão Romano.

Verifica-se o maior valor de C_c no provete BB 13.5 com 2,39 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{m}^{1/2})$. Por outro lado, o provete BDA 3.1 apresenta o valor de C_c mais baixo de apenas 0,86 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{m}^{1/2})$.

Tabela 5.3. Valores individuais e médios do coeficiente de capilaridade obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade dos betões.

Amostra	Provete	Coeficiente de capilaridade $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{1/2})$	
		Individual	Média
BDA 3	BDA 3.1	0,86	1,0
	BDA 3.2	0,89	
	BDA 3.3	1,18	
	BDA 3.4	0,92	
	BDA 3.5	1,17	
BB 9	BB 9.1	2,03	1,96
	BB 9.2	2,11	
	BB 9.3	1,89	
	BB 9.4	2,03	
	BB 9.5	2,12	
	BB 9.6	1,59	
BB 13	BB 13.1	1,79	1,93
	BB 13.2	1,28	
	BB 13.3	2,27	
	BB 13.4	1,87	
	BB 13.5	2,39	
	BB 13.6	2,01	
BB 14	BB 14.1	2,07	2,06
	BB 14.2	2,05	

5.3.7 Secagem

Com base nos resultados obtidos das amostras ensaiadas à secagem, e nas curvas de secagem em relação ao tempo, Figura 5.17, e à raiz quadrada do tempo, Figura 5.18, foram determinadas as duas taxas de secagem, correspondentes à fase 1 (TS1) e fase 2 (TS2) para os provetes de reboco.

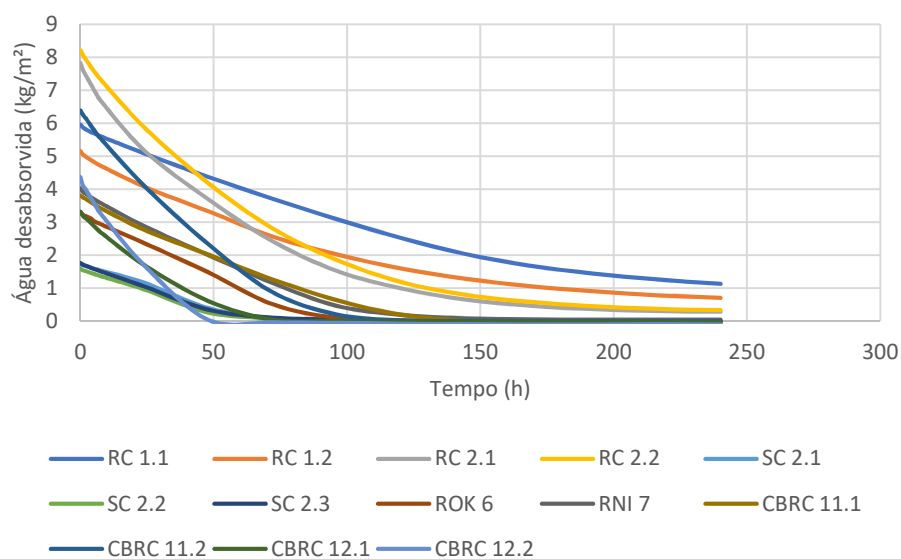


Figura 5.17. Curvas de secagem em função do tempo a partir das quais se determina a taxa na primeira fase de secagem (TS1), provetes de reboco da cisterna, suporte da cisterna, oficina K10 e camada de base da construção circular.

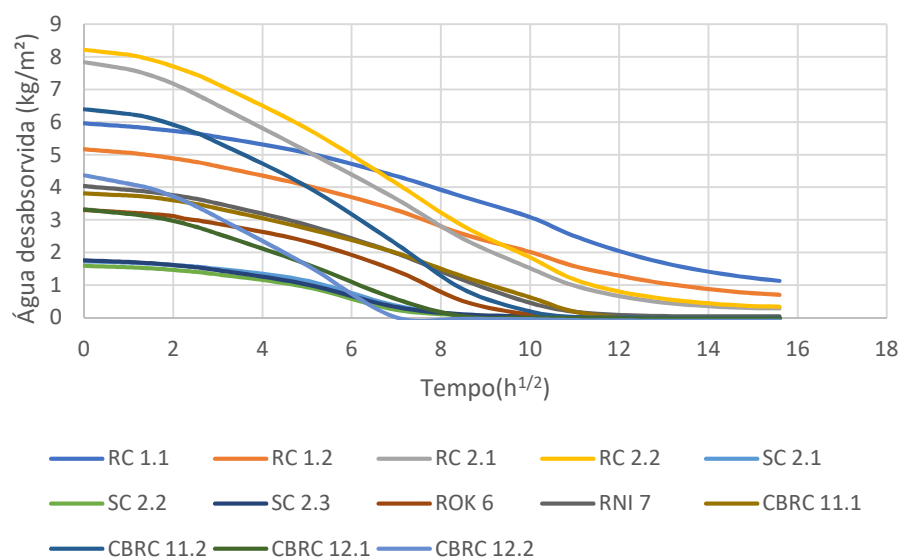


Figura 5.18. Curvas de secagem em função do tempo a partir das quais se determina a taxa na primeira fase de secagem (TS2), provetes de reboco da cisterna, suporte da cisterna, oficina K10 e camada de base da construção circular.

Tabela 5.4. Valores individuais e médios das taxas de secagem dos rebocos.

Amostra	Provete	TS1 kg/(m ² .h)		TS2 kg/(m ² . h ^{1/2})	
		Individual	Média	Individual	Média
RC 1	RC 1.1	0,07	0,08	0,10	0,11
	RC 1.2	0,08		0,12	
RC 2	RC 2.1	0,18	0,16	0,26	0,23
	RC 2.2	0,14		0,20	
SC 2	SC 2.1	0,03	0,04	0,04	0,05
	SC 2.2	0,04		0,05	
	SC 2.3	0,04		0,6	
ROK 6	ROK 6	0,05	0,05	0,08	0,08
RNI 7	RNI 7	0,08	0,08	0,12	0,12
CBRC 11	CBRC 11.1	0,05	0,08	0,07	0,12
	CBRC 11.2	0,12		0,17	
CBRC 12	CBRC 12.1	0,10	0,14	0,15	0,21
	CBRC 12.2	0,19		0,26	

Com base nos resultados obtidos das amostras de betão ensaiadas à secagem, e nas curvas de secagem em relação ao tempo, Figura 5.19 e Figura 5.20, e à raiz quadrada do tempo, Figura 5.21 e Figura 5.22, foram determinadas as duas taxas de secagem, correspondentes à fase 1 (TS1) e fase 2 (TS2) para os provetes de betão.

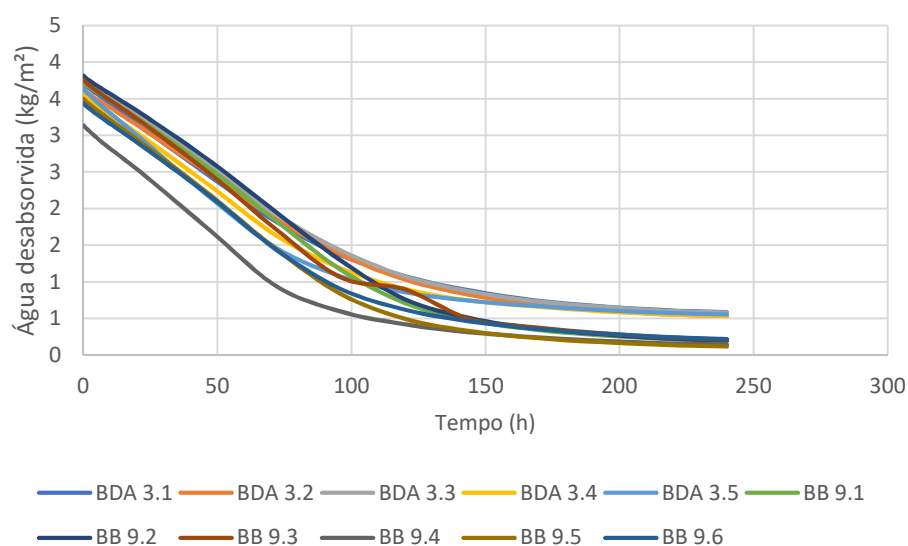


Figura 5.19. Curvas de secagem em função do tempo a partir das quais se determina a taxa na primeira fase de secagem (TS1), provetes de betão do depósito de água e do balneário amostra 9.

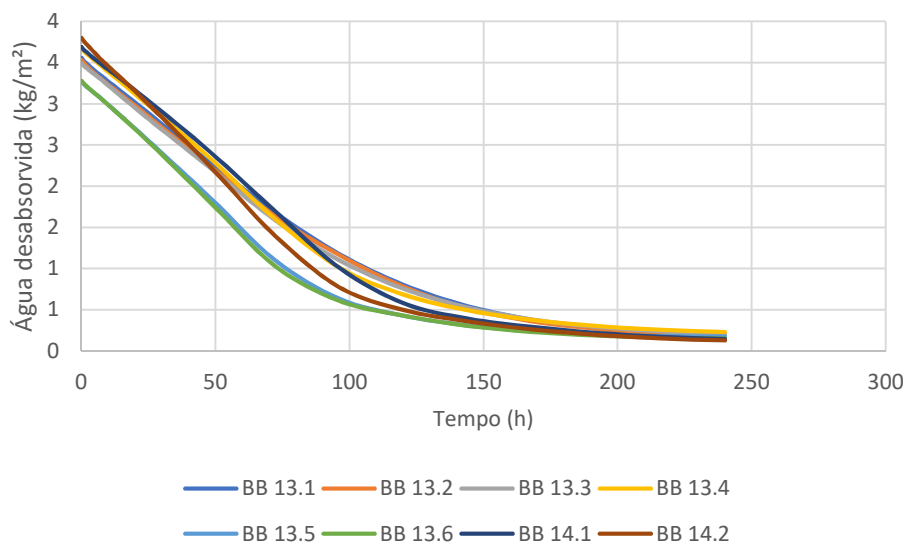


Figura 5.20. Curvas de secagem em função do tempo a partir das quais se determina a taxa na segunda fase de secagem (TS1), provetes de betão do balneário amostras 13 e 14.

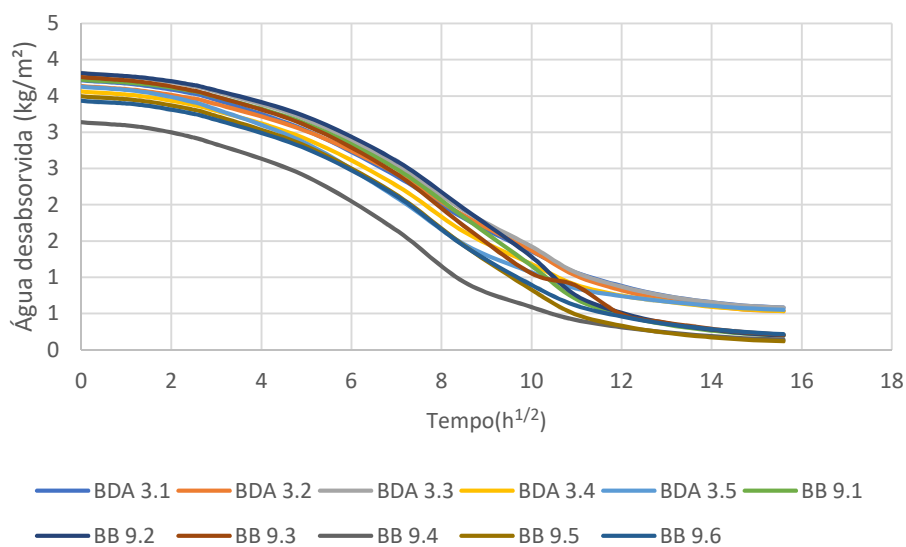


Figura 5.21. Curvas de secagem em função do tempo a partir das quais se determina a taxa na segunda fase de secagem (TS2), provetes de betão do depósito de água e do balneário amostra 9.

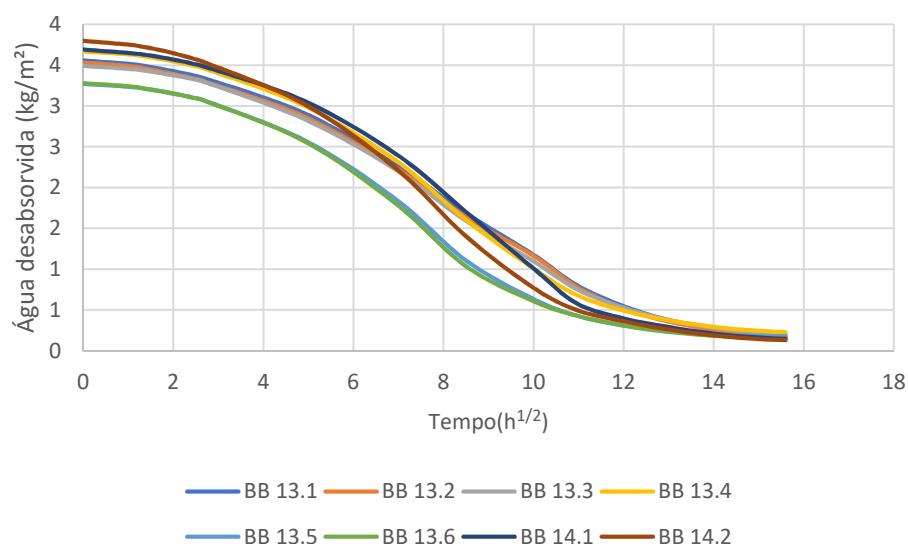


Figura 5.22. Curvas de secagem em função do tempo a partir das quais se determina a taxa na segunda fase de secagem (TS2), provetes de betão do balneário amostras 13 e 14.

Tabela 5.5. Valores individuais e médios das taxas de secagem dos betões.

Amostra	Provete	TS1 kg/(m².h)		TS2 kg/(m². h ^{1/2})	
		Individual	Média	Individual	Média
BDA 3	BDA 3.1	0,04	0,04	0,05	0,05
	BDA 3.2	0,03		0,05	
	BDA 3.3	0,04		0,05	
	BDA 3.4	0,03		0,05	
	BDA 3.5	0,04		0,05	
BB 9	BB 9.1	0,03	0,03	0,04	0,05
	BB 9.2	0,03		0,04	
	BB 9.3	0,04		0,05	
	BB 9.4	0,04		0,05	
	BB 9.5	0,03		0,05	
	BB 9.6	0,03		0,04	
BB 13	BB 13.1	0,04	0,03	0,05	0,05
	BB 13.2	0,04		0,05	
	BB 13.3	0,03		0,04	
	BB 13.4	0,03		0,05	
	BB 13.5	0,03		0,05	
	BB 13.6	0,04		0,05	
BB 14	BB 14.1	0,03	0,04	0,05	0,05
	BB 14.2	0,04		0,06	

Comparando com os resultados de Cotrim Coradinho (2018) para provetes de taipa de castelo do século XII, verifica-se que são bastante menores com os da presente dissertação, entre 0,10 e 0,35 TS1 kg/(m².h) e 0,50 e 1,96 TS2 kg/(m².h).

5.3.8 Resistência a compressão

O ensaio de resistência à compressão foi efetuado segundo o procedimento descrito no subcapítulo 4.3.8. Os resultados obtidos estão presentes na Tabela 5.6.

Analisando os valores obtidos é possível verificar que apresentam altos valores de resistência à compressão em comparação com Cotrim Coradinho (2018), em amostras de taipa militar possuindo valores de 1,23 N/mm² e 1,78 N/mm².

Tabela 5.6. Resultado da resistência a compressão.

Amostra	Provete	F máx (N)	A (mm ²)	Rc (N/mm ²)	MÉD	DES. PAD
RC 1	RC 1.1	13807	1600	8,63	10,08	2,05
	RC 1.2	18449	1600	11,53		
RC 2	RC 2.1	12368	1600	7,73	7,73	
SC 2	SC 2.1	17662	3783	4,67	5,20	1,74
	SC 2.2	25107	3517	7,14		
	SC 2.3	14344	3789	3,79		
ROK 6	ROK 6	11074	1600	6,92	6,92	
RNI 7	RNI 7	6448	1600	4,03	4,03	
CBRC 11	CBRC 11.1	2965	1600	1,85	1,85	
BDA 3	BDA 3.1	23613	4216	5,60	6,61	1,20
	BDA 3.2	21819	4119	5,30		
	BDA 3.3	34001	4381	7,76		
	BDA 3.4	26673	4103	6,50		
	BDA 3.5	34392	4360	7,89		
BB 9	BB 9.1	32163	4469	7,20	7,13	1,22
	BB 9.2	26392	4392	6,01		
	BB 9.3	24666	4254	5,80		
	BB 9.4	26031	3634	7,16		
	BB 9.5	34751	3778	9,20		
	BB 9.6	30573	4123	7,42		
BB 13	BB 13.1	26336	4343	6,06	6,56	1,45
	BB 13.2	27363	3982	6,87		
	BB 13.4	38572	4363	8,84		
	BB 13.5	16082	3276	4,91		
	BB 13.6	26510	4333	6,12		
BB 14	BB 14.1	19081	4365	4,37	3,82	0,77
	BB 14.2	14716	4492	3,28		

Os resultados deste estudo variam de 1,85 a 10,08 N/mm², para os provetes de reboco. Enquanto os provetes de betão Romano variam de 3,82 a 7,13 N/mm².

Comparando a porosidade aberta das amostras (Tabela 5.2) com a respectiva resistência à compressão (Figura 5.5), verifica-se de um modo geral que as amostras que revelaram ter uma menor percentagem de poros abertos, RC 1, apresentaram uma maior resistência à compressão.

Comparando os resultados do ensaio de resistência a compressão com os obtidos por Almeida et al. (2017) para provetes de argamssa de cal, sintetizados na Tabela 2.2, na ordem de valores compreendidos entre 0,39 e 1,61 N/mm², verifica-se que o valor obtido neste presente estudo é superior para os provetes de reboco e para os provetes de betão.

5.4 Resultados dos ensaios químicos e mineralógicos

5.4.1 Determinação de resíduo insolúvel por ataque ácido (RI)

Os valores dos resultados do ensaio de resíduo insolúvel em ácido para os provetes de betão estão indicados na Tabela 5.7 e para os provetes de reboco estão indicados na Tabela 5.8.

Tabela 5.7. Teor de resíduo insolúvel em ácido em betões.

Amostra	Proвете	% RI	Média	Desv. Padrão
BDA 3	BDA 3A	58,8	59	0,56
	BDA 3B	59,6		
BB 9	BB 9A	64,8	64	0,07
	BB 9B	64,9		
BB 13	BB 13A	48,1	48	0,42
	BB 13B	48,7		
BB 14	BB14A	59,1	59	0,38
	BB14B	59,7		

Nos provetes de betão os valores médios de RI (areia siliciosa) não variaram muito e estão compreendidos entre 48,5 e 64,9 %.

Tabela 5.8. Teor de resíduo insolúvel em ácido em rebocos.

Amostra	Provete	% RI	Média	Desv. Padrão
RC 1	RC 1A	28,1	28	0,08
	RC 1B	27,9		
RC 2	RC 2A	22,1	21	0,24
	RC 2B	21,7		
SC 2	SC 2A	20,3	20	0,10
	SC 2B	20,5		
RDA 4	RDA 4A	13,1	13	0,01
	RDA 4B	13,1		
RTL 5	RTL 5A	70,8	70	0,19
	RTL 5B	70,5		
ROK 6	ROK 6A	7,4	7	0,04
	ROK 6B	7,4		
RNI 7/1B	RNI (7/1B)A	32,5	33	0,87
	RNI (7/1B)B	33,8		
RNI 7/1C	RNI (7/1C)A	28,7	28	0,07
	RNI (7/1C)B	28,6		
RNI 7/2	RNI 7/2A	39,8	39	0,02
	RNI 7/2B	39,8		
RT 8	RT 8A	4,0	4	0,29
	RT 8B	4,4		
CBRC 11	CBRC 11A	64,0	64	0,44
	CBRC 11B	64,6		
CBRC 12	CBRC 12A	69,8	69	0,35
	CBRC 12B	69,3		

Nos provetes de reboco os valores médios de RI (areia siliciosa) variaram bastante e estão compreendidos entre 4,2 e 70,7 %.

5.4.2 Análise granulométrica do agregado após ataque ácido

A análise granulométrica do agregado presente nos provetes de reboco e de betão foi efetuada após o ataque ácido. Os valores registados, em %, do material retido e do material que passa em cada peneiro, juntamente com os aspetos geral da observação da areia à lupa binocular estão presentes no Anexos A3.

Na Figura 5.23 estão representadas as curvas dos provetes de reboco, e na Figura 5.24 estão representadas as curvas dos provetes de betão.

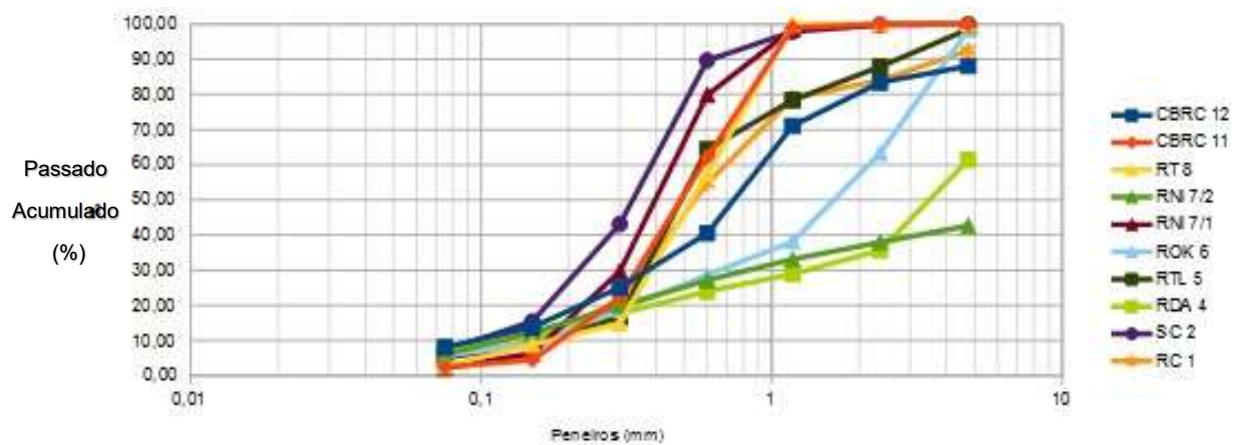


Figura 5.23. Curvas granulométricas do agregado de provetes de reboco.

Analisando as curvas granulométricas da Figura 5.20 verifica-se que os provetes RNI 7/2 e RDA 4 apresentam as maiores percentagens de agregado grosso ($> 4,75$ mm). Nos restantes provetes a distribuição granulométrica dos grãos de agregado é semelhante, não ocorrendo uma grande variação de valores.

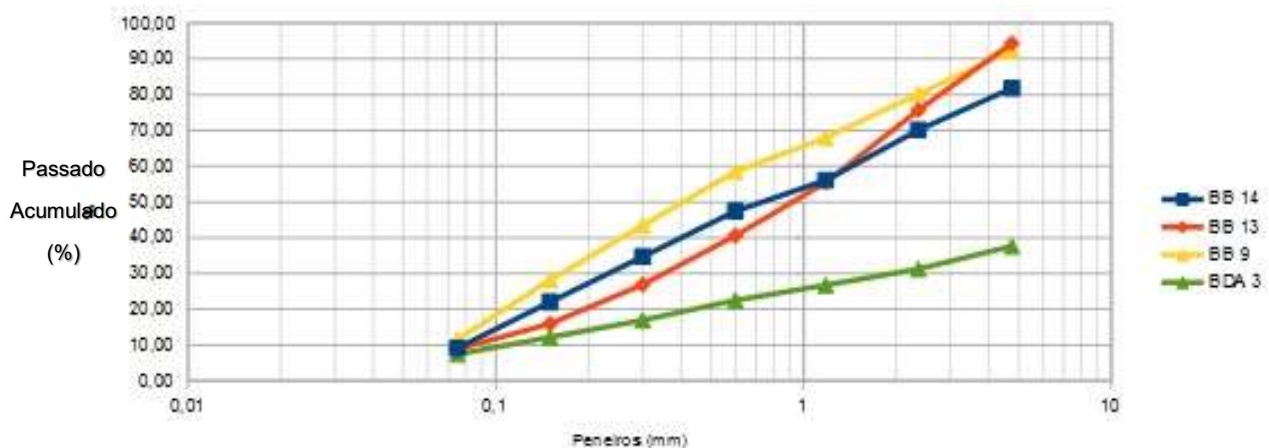


Figura 5.24. Curvas granulométricas do agregado de provetes de betão.

Analisando as curvas granulométricas da Figura 5.24 verifica-se que o provete BDA 3 apresenta a maior percentagem de agregado grosso ($> 4,75$ mm). Nos restantes provetes a distribuição granulométrica dos grãos de agregado é bastante semelhante, não ocorrendo uma grande variação de valores.

Comparando os resultados da análise granulométrica com os obtidos por Silva et al. (2006a) na cidade de Mértola e por Silva et al. (2019) na cidade de Beja para amostras de argamassas calcárias, fração predominante 2,5-0,63mm, verifica-se que os do presente estudo são superiores. Já para os resultados

obtidos Silva et al. (2006b) na Península de Troia para amostras de argamassas calcárias, fração predominante > 5,0mm, verifica-se que os do presente estudo são bem próximos.

5.4.3 Análise mineralógica por difração de raios X (DRX)

Os resultados da análise mineralógica por difração de raios X foram apresentados no Quadro 5.9. Os registos difratométricos obtidos de todas as amostras estão apresentados individualmente no Anexo A3.

Face aos resultados obtidos para a composição mineralógica das amostras pode concluir-se o seguinte:

- Os minerais identificados em maior proporção foram o quartzo, feldspatos, calcite e dolomite, facto que indicia a utilização de agregados siliciosos e calcários. Além destes, a mica, caulinite e hematite são também minerais usuais em areias siliciosas com uma componente argilosa.

- Em termos da pasta do ligante o principal composto detetado foi a calcite, o que indicia que trata de argamassas de cal aérea.

- De referir a presença de vestígios de aragonite e, em alguns casos vaterite, ambos polimorfos do carbonato de cálcio, o que pode estar associado a ocorrência de fenómenos de dissolução/cristalização de carbonatos pela ação da água.

Comparando os resultados da difração de raio-x (DRX) com os obtidos por Silva et al. (2006a) na cidade de Mértola, por Silva et al. (2006b) na Península de Troia, por Silva et al. (2019) na cidade de Beja e por Silva et al. (2014) na cidade de Ammaia para amostras de argamassas calcárias, compostos maioritários quartzo e calcite, verifica-se que os do presente estudo possui resultados muito próximos.

Quadro 5.9 – Composição mineralógica qualitativa das argamassas

Compostos cristalinos identificados	RC 1		RC 2		SC 2		BDA 3		RDA 4		RTL 5	
	Global	FFina	Global	FFina	Global	FFina	Global	FFina	Global	FFina	Global	FFina
Quartzo (SiO ₂)	++	+/++	++	+/++	++	++	++	+/++	+	+	++/+++	++
Feldspatos (KAlSi ₃ O ₈ – NaAlSi ₃ O ₈ – CaAl ₂ Si ₂ O ₈)	-	Vta	+/++	+	+	++	+	+	Vta	Vta	+	Vta/+
Mica (moscovite – KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH,F) ₂ / biotite – K(Mg,Fe ²⁺) ₃ [AlSi ₃ O ₁₀ (OH,F) ₂)	Vta	Vta	Vta	Vta	Vta	Vta	Vta	Vta/+	-	-	+	Vta
Caulinite (Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄)	Vta	Vta	Vta	Vta	Vta	Vta	Vta	Vta	Vta	Vta	+	+/++
Hematite (Fe ₂ O ₃)	Vta	?	?	?	?	?	Vta	Vta	-	-	?	?
Calcite (CaCO ₃)	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
Aragonite (CaCO ₃)	+	+	?	?	-	-	Vta	+	-	Vta/+	Vta	?
Vaterite (CaCO ₃)	?	Vta	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dolomite (CaMg(CO ₃) ₂)	+	Vta/+	+	-	Vta	Vta	Vta	Vta	Vta/+	+	Vta	-
Hidrocalumite (Ca ₂ Al(OH) ₆ [Cl·x(OH)] ₃ ·3(H ₂ O)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Quadro 5.9 – Composição mineralógica qualitativa das argamassas (cont.)

Compostos cristalinos identificados	ROK 6		RNI 7.1A		RNI 7.1B		RNI 7.1C		RNI 7.2		RT 8	
	Global	FF	Global	FF	Global	FF	Global	FF	Global	FF	Global	FF
Quartzo (SiO ₂)	+/++	+/++	-	++	+++	++	+++	++	++/+++	++	Vta	+
Feldspatos (KAlSi ₃ O ₈ – NaAlSi ₃ O ₈ – CaAl ₂ Si ₂ O ₈)	+	+	-	+	++	Vta/+	+/++	Vta/+	+/++	Vta	-	-
Mica (moscovite – KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH,F) ₂ / biotite – K(Mg,Fe ²⁺) ₃ AlSi ₃ O ₁₀ (OH,F) ₂)	?	-	-	Vta	Vta/+	?	Vta/+	-	Vta/+	Vta	-	-
Caulinite (Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄)	Vta	Vta	-	Vta	Vta	Vta	Vta	Vta	Vta	Vta	-	-
Hematite (Fe ₂ O ₃)	?	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Calcite (CaCO ₃)	++/+++	+++	-	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
Aragonite (CaCO ₃)	+	+/++	-	+	+	+	Vta/+	Vta/+	Vta	-	-	-
Vaterite (CaCO ₃)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dolomite (CaMg(CO ₃) ₂)	++/+++	++	-	+	++	+/++	++	+	-	-	+++	+
Hidrocalumite (Ca ₂ Al(OH) ₅ [Cl _{1-x} (OH) _x].3(H ₂ O))	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Quadro 5.9 – Composição mineralógica qualitativa das argamassas (cont.)

Compostos cristalinos identificados	BB 9		CBRC 11		CBRC 12		BB 13		BB 14	
	Global	FF	Global	FF	Global	FF	Global	FF	Global	FF
Quartzo (SiO ₂)	++/+++	++	+++	+/++	+++	++	++	+/++	++	+/++
Feldspatos (KAlSi ₃ O ₈ – NaAlSi ₃ O ₈ – CaAl ₂ Si ₂ O ₈)	+/++	+	Vta/+	Vta	++	+/++	+/++	Vta	+/++	+
Mica (moscovite – KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH,F) ₂ / biotite – K(Mg,Fe ²⁺) ₃ AlSi ₃ O ₁₀ (OH,F) ₂)	Vta/+	Vta	?	Vta	+	+/++	Vta/+	-	Vta/+	Vta/+
Caulinite (Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄)	?	?	Vta/+	+/++	+	+/++	?	Vta	Vta	Vta/+
Hematite (Fe ₂ O ₃)	Vta	Vta	Vta	-	?/Vta	Vta	Vta	-	Vta	
Calcite (CaCO ₃)	++/+++	+++	+++	+++	++	++/+++	++/+++	+++	++/+++	+++
Aragonite (CaCO ₃)	-	-	Vta	-	-	-	-	-	-	-
Vaterite (CaCO ₃)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dolomite (CaMg(CO ₃) ₂)	Vta	?	Vta/+	Vta	Vta/+	+	-	Vta/+	Vta	Vta
Hidrocalumite (Ca ₂ Al(OH) ₅ [Cl _{1-x} (OH) _x].3(H ₂ O))	-	Vta	-	-	-	-	-	-	-	-

5.4.4 Análise termogravimétrica e térmica diferencial (ATG/dTG/ATD)

Da análise das curvas ATG/ATD/DTG consideraram-se 3 gamas de temperatura onde ocorrem perdas de massa que, de acordo com a composição mineralógica por DRX das amostras, são atribuíveis a:

- 20 a 250 °C – zona de perda devida à desidratação de água livre, de hidratação e zeolítica;
- 250 a 550 °C – zona de perda devida essencialmente à desidroxilação dos minerais de argila;
- 550 a 900 °C – zona de perda devida à descarbonatação dos carbonatos.

Abaixo são apresentadas as curvas dos provetes nas Figura 5.25 até a Figura 5.40.

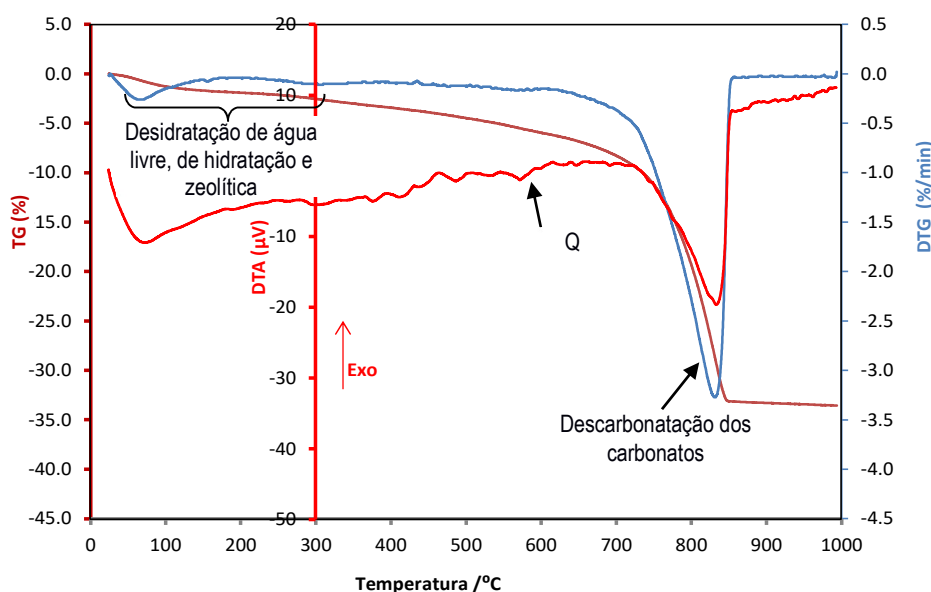


Figura 5.25. Registos ATG/DTG/ATD do provete RC 1

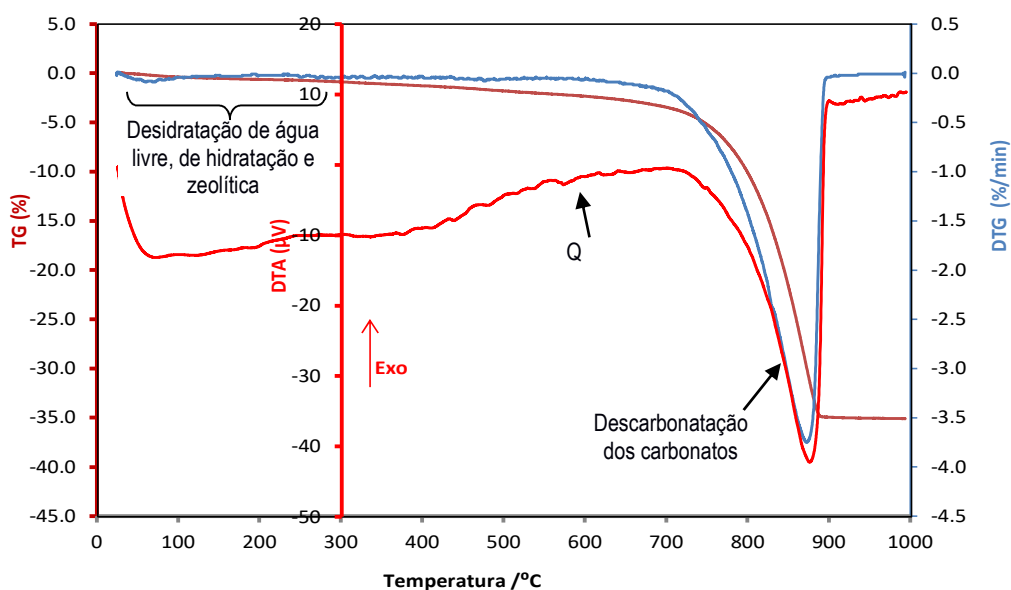


Figura 5.26. Registos ATG/DTG/ATD do provete RC 2

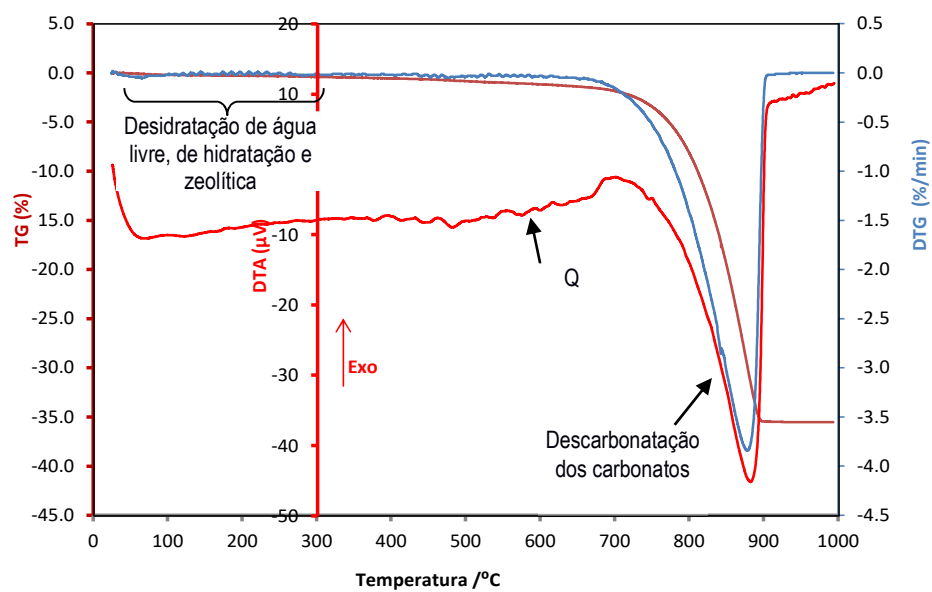


Figura 5.27. Registos ATG/DTG/ATD do provete SC 2

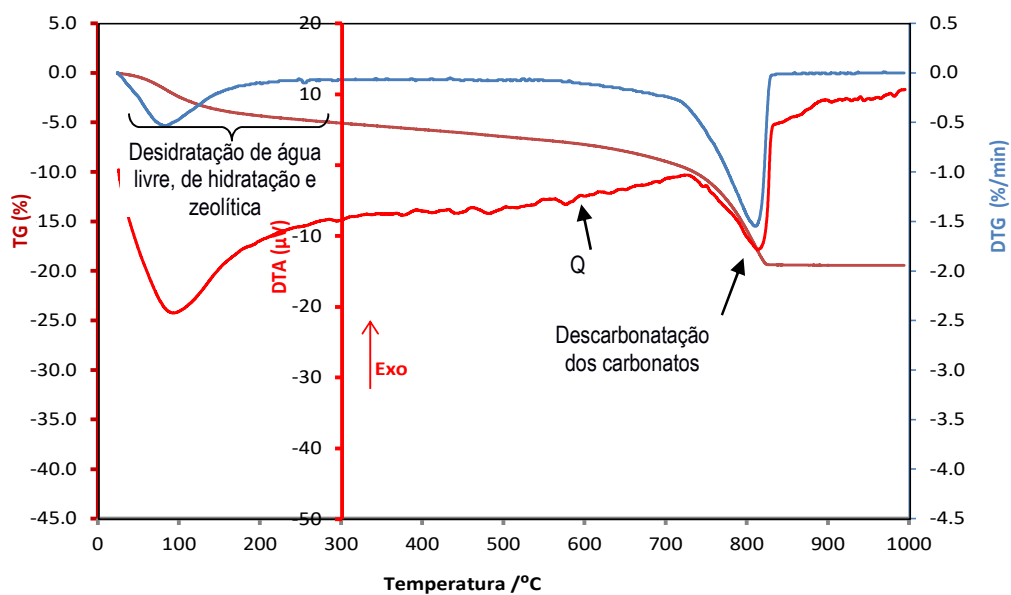


Figura 5.28. Registos ATG/DTG/ATD do provete BDA 3

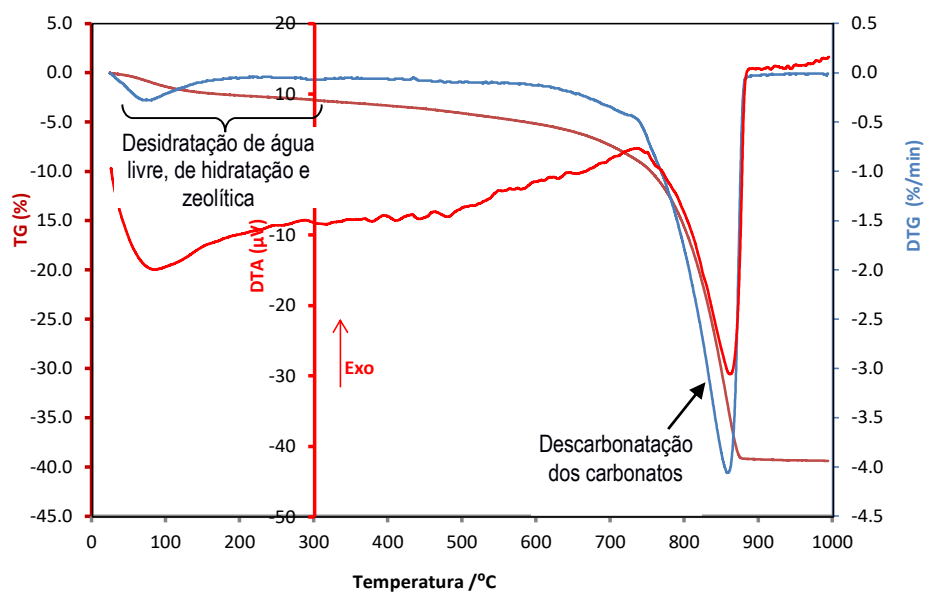


Figura 5.29. Registos ATG/DTG/ATD do provete RDA 4

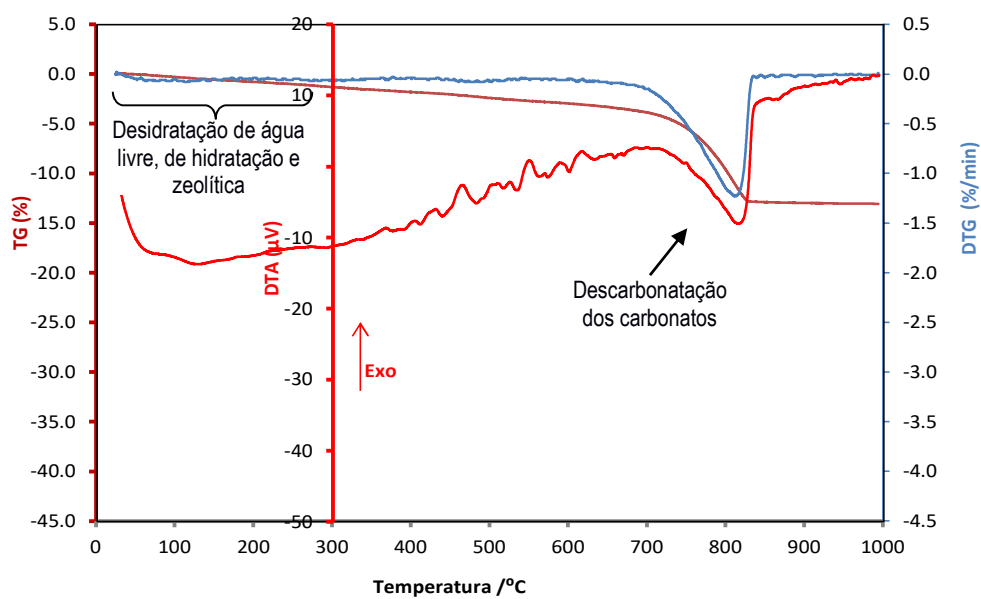


Figura 5.30. Registos ATG/DTG/ATD do provete RTL 5

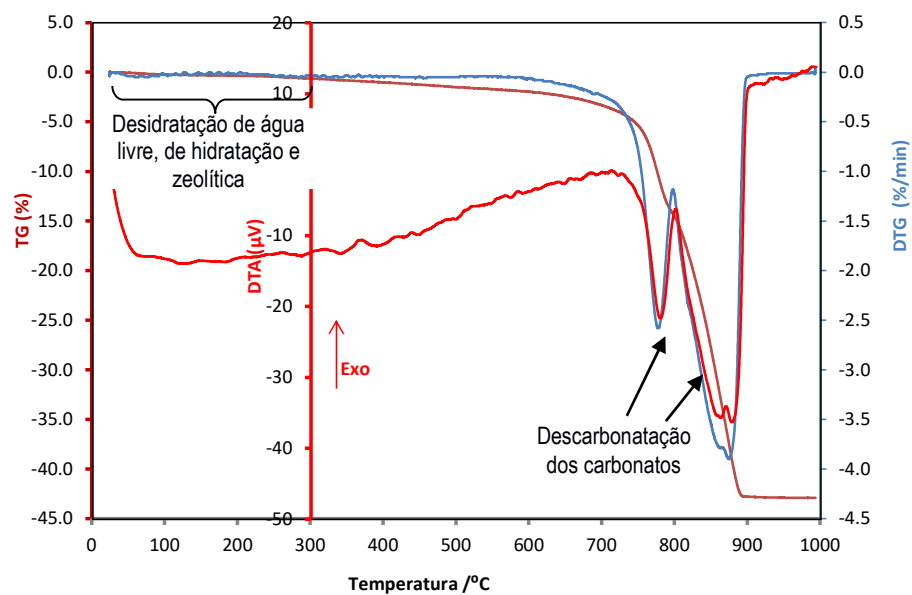


Figura 5.31. Registos ATG/DTG/ATD do provete ROK 6

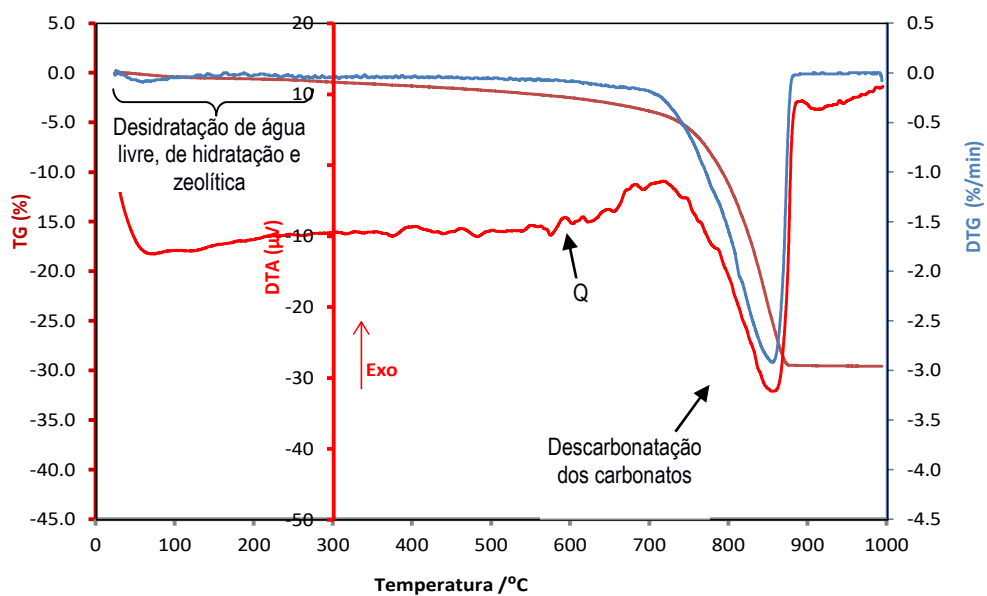


Figura 5.32. Registos ATG/DTG/ATD do provete RNI 7.1B

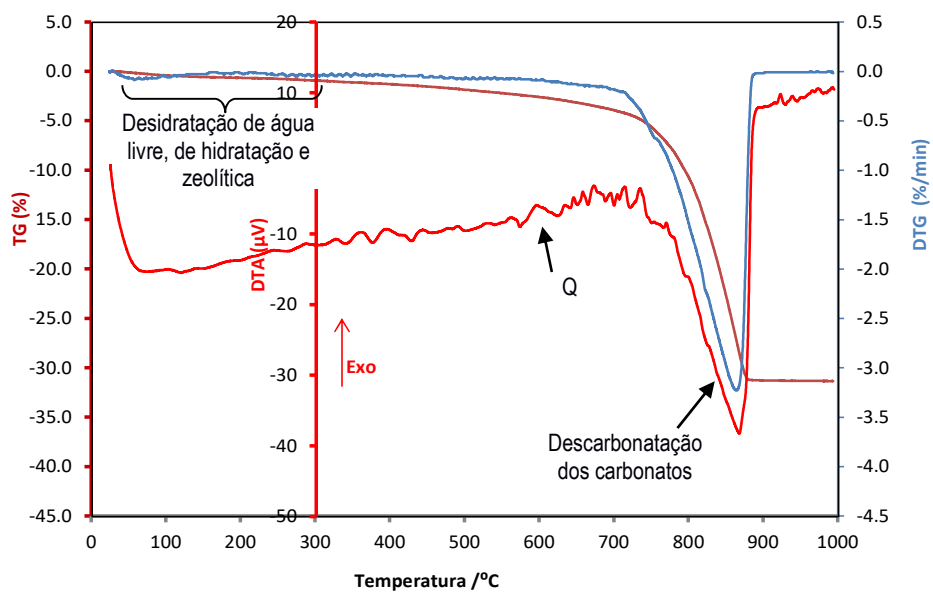


Figura 5.33. Registos ATG/DTG/ATD do provete RNI 7.1C

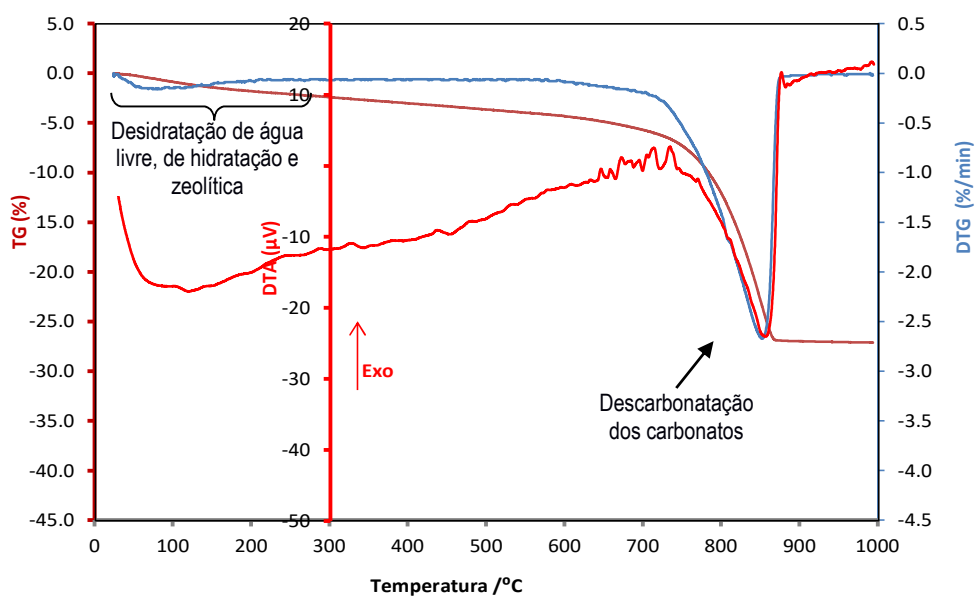


Figura 5.34. Registos ATG/DTG/ATD do provete RNI 7.2

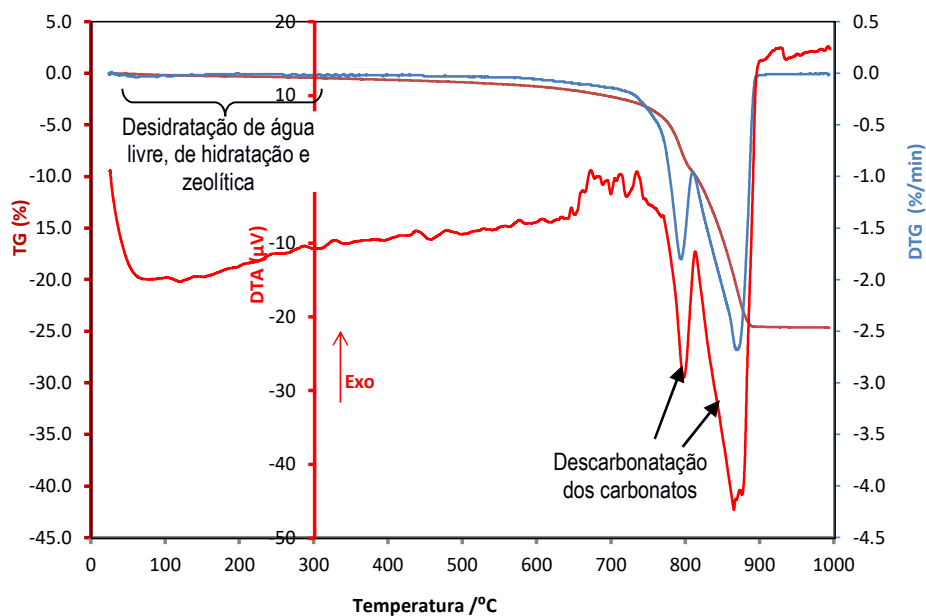


Figura 5.35. Registos ATG/DTG/ATD do provete RT 8

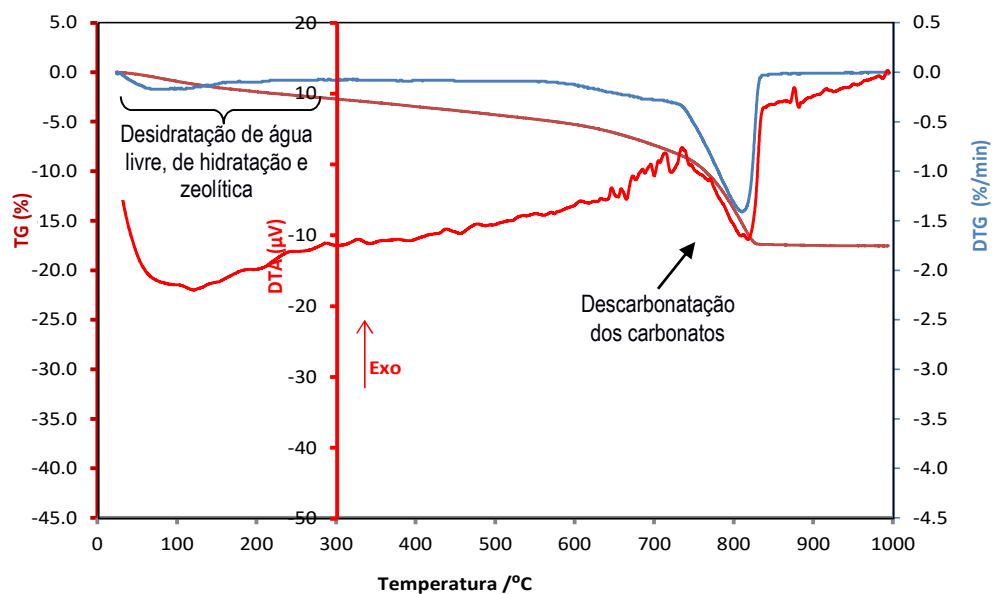


Figura 5.36. Registos ATG/DTG/ATD do provete BB 9

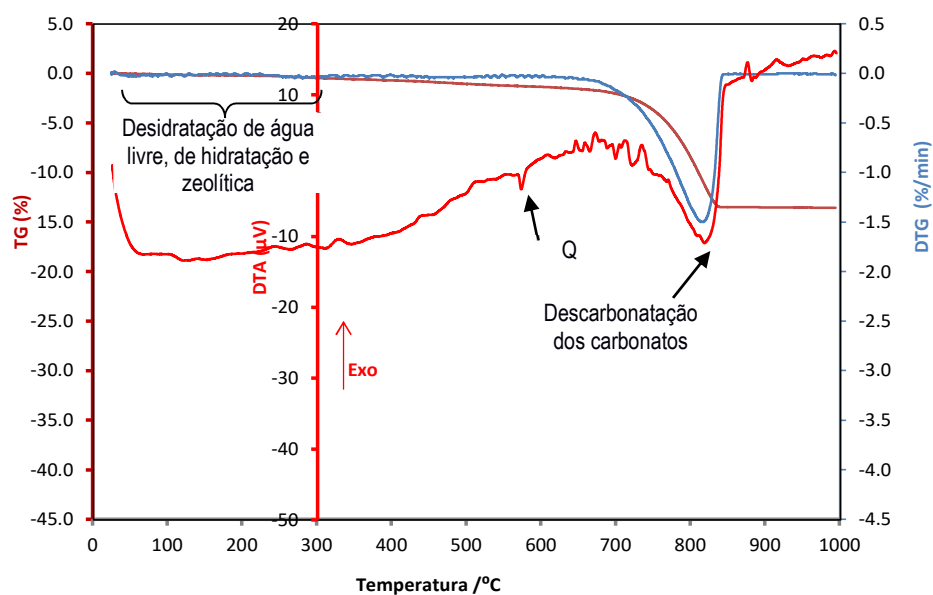


Figura 5.37. Registos ATG/DTG/ATD do provete CBRC 11

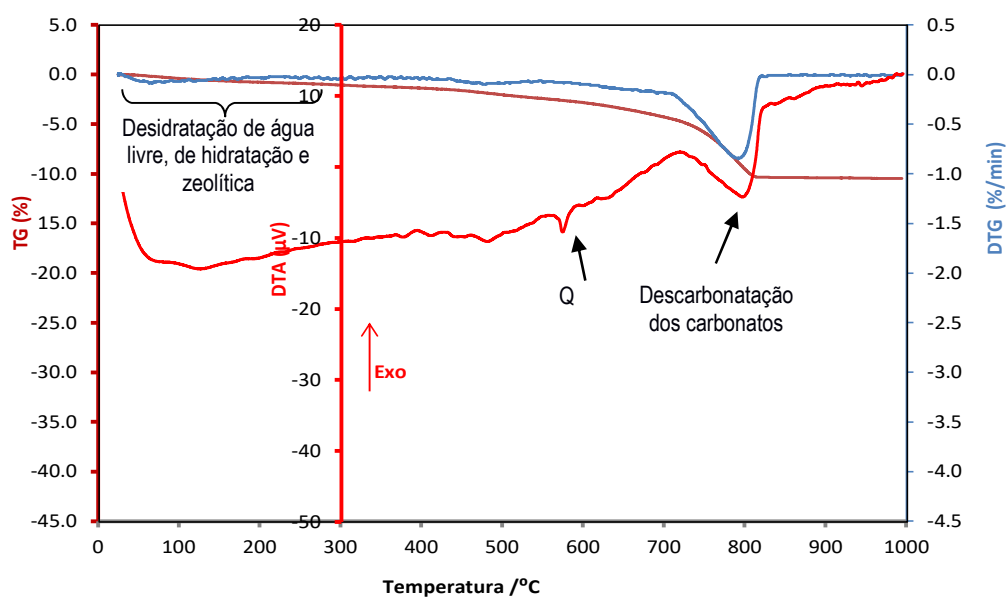


Figura 5.38. Registos ATG/DTG/ATD do provete CBRC 12

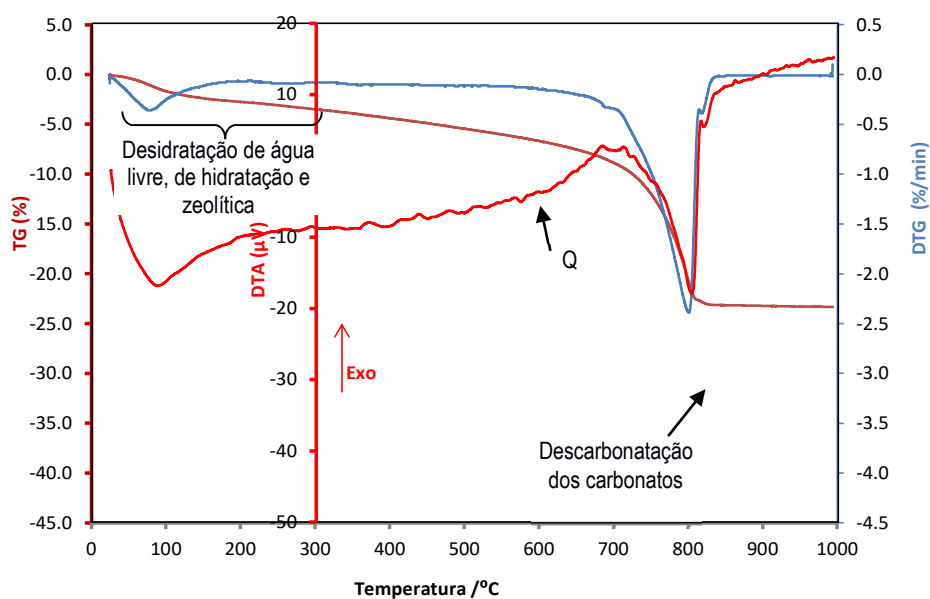


Figura 5.39. Registos ATG/DTG/ATD do provete BB 13

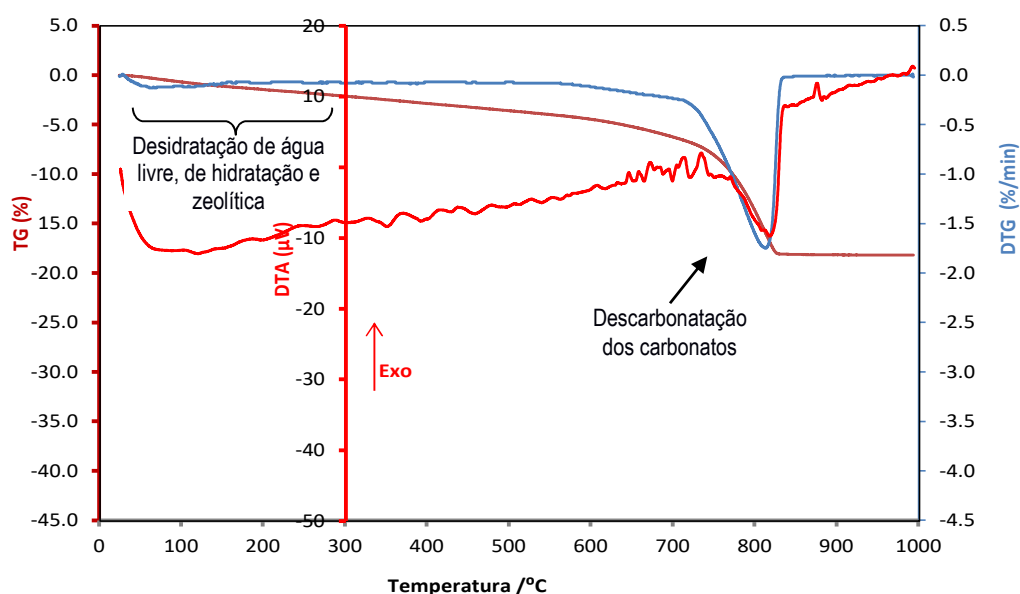


Figura 5.40. Registos ATG/DTG/ATD do provete BB 14

Verifica-se que as curvas ATG/DTG apresentam um comportamento consentâneo com as composições mineralógicas anteriormente obtidas, com as principais perdas de massa atribuíveis à descarbonatação do carbonato de cálcio, e ainda à descarbonatação do carbonato de cálcio e magnésio nos provetes ROK 6 e RT 8.

As curvas ATD mostram um comportamento semelhante e consentâneo com o das curvas DTG, como é habitual para este tipo de materiais, havendo apenas a presença de um pico endotérmico, a cerca de 580 °C, que corresponde à transição $\alpha \rightarrow \beta$ do quartzo.

Comparando os resultados da análise termogravimétrica e térmica diferencial (ATG/ATD) com os obtidos por Silva et al. (2019) na cidade de Beja, por Velosa et al. (2007) na cidade de Conímbriga e por Silva et al. (2014) na cidade de Ammaia para amostras de argamassas calcárias, termogramas típicos de argamassas antigas de cal, com perda de massa acentuada entre 600 e 900°C, verifica-se que os do presente estudo possui resultados muito próximos.

Da Tabela 5.10 verifica-se que, em termos globais, o provete ROK 6 é o que apresenta a maior perda ao rubro, facto essencialmente relacionado com a maior perda de massa devida à descarbonatação dos carbonatos (550 – 900 °C).

Tabela 5.10 – Perdas de massa (%) em diferentes gamas de temperatura dos provetes

Identificação das amostras	Gamas de Temperatura (°C)			Perda ao Rubro [‡]
	25-200	200-550	550-900	
RC 1	1,91	3,24	28,15	33,57
RC 2	0,64	1,43	32,89	35,09
SC 2	0,28	0,70	34,48	35,54
BDA 3	4,33	2,46	12,64	19,44
RDA 4	2,30	2,29	34,63	39,37
RTL 5	0,80	1,89	10,28	13,05
ROK 6	0,38	1,34	41,06	42,91
RNI 7.1B	0,61	1,50	27,41	29,57
RNI 7.1C	0,64	1,56	29,09	31,36
RNI 7.2	1,79	2,17	23,02	27,11
RT 8	0,30	0,74	23,54	24,66
BB 9	1,98	2,77	12,75	17,55
CBRC 11	0,23	1,00	12,29	13,57
CBRC 12	0,77	1,64	7,98	10,47
BB 13	2,74	3,27	17,22	23,34
BB 14	1,45	2,52	14,19	18,20

[‡] Valor da perda de massa entre 25 e 1000 °C

6. Conclusões

6.1 Considerações finais

Na atualidade, ainda é necessário conscientizar para a importância da preservação e conservação do património arquitetónico e arqueológico. Engloba valores sociais, culturais e técnicos, que é importante conhecer para que a eficiência das intervenções de conservação e restauro sejam cumpridas. As caracterizações materiais e tecnológicas são parâmetros de grande importância para a definição das metodologias de conservação e restauro do património edificado.

Uma análise mais detalhada sobre estudos anteriores revelou a ausência de caracterização material de argamassas e betões do sítio arqueológico do Creiro. A maioria das informações existentes são sobre a localização geográfica, o tipo, a forma, como a edificação é dividida e a finalidade de uso da construção. Deste modo, considerou-se importante a realização deste estudo, obtendo alguns dados e informações sobre estas estruturas arqueológicas. Assim surgiu o objetivo e a metodologia da presente dissertação, onde foi feita uma visita ao local, foi realizada uma campanha experimental de caracterização com ensaios não destrutivos realizados in situ, a recolha (possível) de amostras e a caracterização em laboratório destas amostras, para obtenção de resultados sobre as argamassas e betões do sítio arqueológico do Creiro.

Os ensaios não destrutivos realizados in situ provaram ser interessantes e de fácil interpretação. A caracterização experimental in situ através dos ensaios de impacto por choque de esfera, resistência superficial pelo esclerómetro e resistência superficial pelo durómetro, revelam boas características de resistência. Sobre o comportamento à água dos rebocos das antigas estruturas industriais, onde eram processados compostos piscícolas, tal como expectável revelam ser impermeáveis, mesmo ao fim de tantos anos de idade e exposição, o que revela a boa qualidade dos rebocos romanos efetuados.

Os ensaios físico-mecânicos, realizados em laboratório às amostras recolhidas, apresentaram bons resultados de resistência superficial por durómetro, de acordo com o esperado face aos resultados previamente obtidos nos ensaios in situ, com resultados entre 78 e 84 Shore A. Os resultados da resistência superficial por durómetro ficou acima dos 80 Shore A para os provetes de reboco, com exceção dos provetes ROK 6, foi retirado da Oficina K10 e CBRC 12.1, foi retirado da construção circular e que tiveram os valores de 79 e 73 Shore A respetivamente.

Os resultados dos ensaios de massa volúmica, dos provetes cúbicos de betão, apresentaram resultados sem grandes variações de resultados entre si, variando entre 1563 e 1725 kg/m³. A exceção ficou para o provete de suporte de reboco SC 2.2 com 1991 kg/m³. O módulo de elasticidade dinâmico também foi determinado em provetes cúbicos de betão e apresentou resultados variando entre 779 e 1144 MPa, indiciando alguma capacidade de deformação, acompanhando movimentos dos suportes. Os ensaios de velocidade de propagação de ultrassons foram realizados em provetes de reboco e tiveram resultados médios entre 786 e 1149 m/s, indiciando argamassas porosas, tal como expectável no caso das de cal aérea.

Os valores dos coeficientes de capilaridade e taxas de secagem mostram comportamentos distintos à presença de água. O Cc médio nos provetes de reboco encontra-se no intervalo de valores 0,16 – 1,77 kg/(m².min^{1/2}), e os valores das TS1 e TS2 estão entre os 0,88 - 4,17 kg/(m².h) e os 0,54 – 2,56 kg/(m².h^{1/2}), respetivamente. O Cc médio nos provetes de betão encontra-se no intervalo de valores 1,00 – 2,06 kg/(m².min^{1/2}), e os valores das TS1 e TS2 estão entre os 1,77 - 1,91 kg/(m².h) e os 1,06 – 1,14 kg/(m².h^{1/2}), respetivamente. Os provetes apresentam assim, no geral, valores de TS1 mais elevados e de TS2 mais baixos, indiciando que a secagem se efetua maioritariamente na primeira fase.

Os ensaios de resistência a compressão dos provetes de reboco tiveram resultados muito altos variando de 4,03 – 10,08 N/mm². A exceção foi o provete CBRC 11.1 que teve um resultado de 1,85 N/mm². Os provetes de betão de cal tiveram resultados que variavam 3,82 – 7,13 N/mm². Os ensaios de porosidade aberta apresentaram resultados que variaram de 11,58 – 27,84 %, para todos os provetes. Também foi ensaiada a massa volúmica aparente que ficou um pouco acima do resultado da massa volúmica pelo método geométrico, variando de 1700 – 2285 kg/m³. A massa volúmica real teve resultados mais altos ainda variando de 2140 – 2611 kg/m³.

Por fim, os resultados do ensaio de resíduo insolúvel revelam que existe uma variação muito grande entre os provetes de reboco, que vão de 7,5 a 70,7%. Os resultados do resíduo insolúvel dos provetes de betão variam menos, vão de 48,5 a 64,9%.

Muito embora as limitações ocorridas no desenvolvimento desta dissertação, considera-se que o objetivo principal de contribuir para aumentar o conhecimento sobre argamassas arqueológicas, especificamente Romanas e da região de Setúbal, foi devidamente alcançado e cumprido.

6.2 Desenvolvimentos futuros

Um trabalho de investigação sempre surge ideias e propostas para futuros estudos visando aprofundar o estudo. Para o presente caso as propostas são:

- Realizar de inspeções em diferentes locais do sítio arqueológico do Creiro, em particular o edifício H, os armazéns e a Oficina K10, visto que não se analisou estas zonas da estrutura.
- Realizar a caracterização microestrutural das amostras existentes, nomeadamente microscopia electrónica de varrimento e complementando essa análise com os resultados obtidos dos ensaios físicos, mecânicos, químicos e mineralógicos.
- Realizar o estudo do resíduo solúvel, nomeadamente os sulfatos e cloretos, das amostras existentes.
- Realizar este tipo de caracterização em outro sítio arqueológico do período Romano, para que se consiga um maior número de casos de comparação.

Referências

Alessandrini, G., Bugini, R., Negrotti, R., Toniolo, L. (1991), Characterisation of plasters from the church of San Niccolò di Comelico. *European Journal of Mineralogy*, 3 (3), 619 – 628.

Almeida, L.F.S. (2015), Caracterização das argamassas da muralha Tardo-Romana de Olisipo. Dissertação de Mestrado em Geologia Aplicada, Universidade de Lisboa.

Almeida, L., Silva, A.S., Almeida, I.M. (2017), Caracterização das argamassas da muralha Tardo-Romana de Olisipo, *Imprensa da Universidade de Coimbra, digitAR*, 4, 15-21.

ASTM (2008). ASTM C805-08: Standard test method for rebound hammer of hardened concrete. ASTM Standarts: United States.

ASTM (2010). ASTM D2240-05: Standard test method for rubber property. ASTM Standarts: United States.

ASTM (2014). ASTM C136/C136M: Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates. ASTM Standarts: United States.

Cardoso, J.L. (2014), António Inácio Marques da Costa (1857-1933), Setúbal, Tróia e a Arrábida: percursos de um pioneiro dos estudos arqueológicos regionais em Portugal vistos pela correspondência enviada a José Leite de Vasconcelos, *Setúbal Arqueológica* 15, 11-44.

CEN (1999). EN 1015-11 Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength, Brussels.

CEN (2009). EN 15801: Conservation of cultural property - Test methods. Determination of water absorption by capillarity. Brussels.

CEN (2013a). EN 16302: Conservation of cultural heritage - Test methods. Measurement of water absorption by pipe method. Brussels.

CEN (2013b). EN 16322: Conservation of cultural heritage - Test methods. Determination of drying properties. Brussels.

Damas, A.L., Veiga, M.R., Faria, P. (2016), Caracterização de argamassas antigas de Portugal – contributo para sua correta conservação. In: Congresso Ibero-Americano “Património, suas Matérias e Imatérias”. LNEC, Lisboa.

Damas, A.L. (2017), Caracterização de argamassas de assentamento de azulejos antigos. Dissertação de Mestrado Engenharia Civil, Universidade NOVA de Lisboa.

Damas, A.L., Veiga, M.R., Faria, P., Santos Silva, A. (2018), Characterisation of old azulejos setting mortars: A contribution to the conservation of this type of coatings, *Construction and Building Materials* 171, 128–139.

Falcão, S. (2010), Caracterização das argamassas antigas da igreja do Colégio de Portimão. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa.

Faria, P., Silva, V., Jamú, N., Dias, I., Gomes, M. I. (2014), Evaluation of air lime and clayish earth mortars for earthen wall renders. *Vernacular Heritage and Earthen Architecture: Contributions for Sustainable Development*, 407-413.

Faria, P. (2018), Argamassas de cal e terra: características e possibilidades de aplicação. *Ambiente Construído* 18, 49-62. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212018000400292X>

Faria, P., Lima, J. (2018), Rebocos de Terra. *Cadernos de Construção com Terra*, 3, Argumentum.

IPQ (2006). NP EN 14146: Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico (através da medição da frequência de ressonância fundamental). IPQ, Caparica.

IPQ (2011), NP EN 459-1. Cal de construção. Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade. IPQ, Caparica.

Godinho, V.M.F. (2014), Caracterização das argamassas de edifícios antigos de Vizeu. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Construção e Reabilitação. Instituto Politécnico de Vizeu.

LNEC (1980). FE Pa 25. Fichas de ensaio de revestimentos de paredes. Ensaio de choque de esfera. Lisboa.

LNEC (2015a). FE Pa 42. Métodos de ensaio de revestimentos de paredes existentes. Lisboa.

LNEC (2015b). FE Pa 43. Fichas de ensaio de revestimentos de paredes. Ensaio de avaliação de características mecânicas por ultrassons. Lisboa.

LNEC (2015c). FE Pa 44. Revestimentos de paredes. Determinação da porosidade aberta e das massas volúmicas aparente e real. Lisboa.

LNEC (2016). FE Pa 49.1. Fichas de ensaio para revestimentos de paredes. Ensaio de avaliação da dureza superficial do reboco com durómetro. Lisboa.

Margalha, M.G. (2011), Argamassas. Documento de apoio às aulas de Conservação e Recuperação do Património. Évora: Universidade de Évora.

Margalha, G., Veiga, M.R., Brito, J. (2007), Influência das areias na qualidade de argamassas de cal aérea. 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção. APFAC, Lisboa.

Marques da Costa, A.I. (1907), Estações pré-históricas dos arredores de Setúbal. *O Arqueólogo Português*, 12, 206-217.

Miriello, D., Bloise, A., Crisci, G.M., Apollaro, C. La Marca, A. (2011), Characterisation of archaeological mortars and plasters from Kyme (Turkey). *Journal of Archaeological Science* 38, 794 -804.

Moropoulou, A., Bakolas, A., Bisbikou, K. (2000), Investigations of the technology of historic mortars. *Journal of Cultural Heritage* 1, 45-58

Nunes, C., Slížková, Z., Krřivánková, D. (2013), Lime-based mortars with linseed oil: sodium chloride resistance and characterization of the degraded material, *Periodico di Mineralogia* 82 (3) 411-427. <https://doi.org/10.2451/2013PM0024>

Parracha, J.L., Silva A.S., Cotrim, M., Faria, P. (2020), Mineralogical and microstructural characterisation of rammed earth and earthen mortars from 12th century Paderne Castle. *Journal of Cultural Heritage* 42, 226-239. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.07.021X>

Papayianni, I., Stefanidou, M. (2007), Durability aspects of ancient mortars of the archeological site of Olynthos. *Journal of Cultural Heritage* 8(2), 193-196. <http://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2007.03.001>

Faria Rodrigues, P. (2004), Argamassas de revestimento para alvenarias antigas. Contribuição para o estudo da influência dos ligantes. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil – Reabilitação do Património Edificado, Universidade NOVA de Lisboa.

Santos Silva, A., Adriano, P., Magalhães, A., Pires, J., Carvalho, A., Cruz, A.J., Mirão, J., Candeias, A. (2010), Characterization of historical mortars from Alentejo's religious buildings. *International Journal of Architectural Heritage*, 4(2), 138-154.

Silva, C.T., Soares, A.C. (1987), Escavações Arqueológicas no Creiro. *Setúbal Arqueológica*, VIII, 221-235.

Silva, C.T., Soares, A.C. (2016), Creiro (Arrábida): um estabelecimento de produção de preparados de peixe da Época Romana, *Revista Portuguesa de Arqueologia*, 19, 211–234.

Silva, A.S., Ricardo J.M., Salta, M., Adriano, P., Mirão, J., Candeias, A.E, Macias, S. (2006a), Characterization of Roman mortars from the historical town of Mértola. HWC 2006 - Heritage, International Weathering and Conservation Conference, Madrid.

Silva, A.S., Paiva, M., Ricardo, J.M., Salta, M., Monteiro, A.M., Candeias, A.E. (2006b), Characterisation of roman mortars from the archaeological site of Tróia (Portugal). *Material Science Forum* 514, 1643–1647.

Silva, A.S., Cardoso, I., Macedo, M.F., Vermeulen, F., Corsi, C., Rosado, L., Candeias, A., Mirão, J. (2014), A multidisciplinary approach to the study of archaeological mortars from the town of Ammaia in the Roman province of Lusitania (Portugal). *Archaeometry* 56, 1-24.

Silva, A.S., Borsoi, G., Menezes, P., Candeias, A., Mirão, J. (2019), Analytical characterization of ancient mortars from the archaeological roman site of Pisões (Beja, Portugal). *Construction and Building Materials* 204, 597–608.

Válek, J., Veiga, M.R. (2005), Characterisation of mechanical properties of historic mortars. STREMAH 2005 – 9th International Conference on Structural Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture, Malta.

Veiga, R., Faria, P. (1990), Revestimentos de ligantes minerais e mistos com base em cimento, cal e resina sintética. Curso de Especialização sobre Revestimentos de Paredes. 1º Módulo. Lisboa, LNEC, 40-173. <http://run.unl.pt/handle/10362/9943X>

Veiga, M.R., Aguiar, J., Silva, A. S., Carvalho, F. (2001), Methodologies for characterisation and repair of mortars of ancient buildings. *International Seminar of Historical Constructions*, Universidade do Minho, Guimarães.

Veiga, M., Velosa, A., Magalhães, A. (2009), Experimental applications of mortars with pozzolanic additions: characterization and performance evaluation. *Construction and Building Materials* 23, 318–327. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.12.003>

Velosa, A., Coroado, J., Veiga, R., Rocha, F. (2007), Characterisation of roman mortars from Conímbriga with respect to their repair, *Materials Characterisation* 58, 1208–1216.

Anexos

Anexo A1 – Resultados detalhados da caracterização in situ

Impacto por choque de esfera

Tabela A1.1. Resultados em mm de impacto por choque de esfera.

R. C. N.	
1	14,74
2	13,99
3	12,48
4	11,85
5	12,19
6	13,11
7	14,70
Média	13
Desvio Padrão	1,19

Resistência superficial pelo esclerômetro pendular

Tabela A1.2. Resultado em Vickers da resistência superficial por esclerômetro pendular.

Reboco Cisterna Norte		Reboco Tanques Of. F14 Poente		Reboco Tanques Of. F14 Sul		Reboco Frigidarium Poente		Reboco Frigidarium Sul	
1	42	1	35	1	69	1	97	1	44
2	65	2	50	2	60	2	92	2	31
3	78	3	54	3	51	3	86	3	31,5
4	45	4	38	4	64	4	87	4	34
5	78	5	39	5	70	5	82	5	48
6	82	6	45	6	40	6	86	6	21
7	49	7	44	7	40	7	80	Média	35
8	70	8	30	8	53	8	74	Des. Padrão	9,7
9	45	9	39	9	35	9	35		
10	49	10	29	10	29	10	33		
11	80	Média	40	11	24	11	36		
12	69	Des. Padrão	8,1	12	24	12	45		
13	56			13	35	13	48		
14	70			14	41	14	46		
15	68			15	48	15	50		
16	63			16	30	16	46		
17	82			17	42	17	37,5		
18	78			18	54	Média	62		
19	52			19	47	Des. Padrão	23,4		
20	60			20	36				
21	60			21	69				
22	72			22	64				
23	42			23	59				
24	64			24	56				
25	68			25	29				
26	55			26	36				
27	50			Média	46				
28	55			Des. Padrão	14,5				
29	74								
30	73								
31	61								
32	31								
33	75								
34	42								
Média	62								
Des. Padrão	13,7								

Resistência superficial por durômetro.

Tabela A1.3. Resultado em Shore A da resistência superficial por durômetro.

Reboco Cisterna Sul		Reboco Construção Circular		Reboco Tanque Of. F14		Reboco Frigidarium Ponte		Reboco Frigidarium Sul	
1	65	1	80	1	64	1	82	1	68
2	86,5	2	72	2	81	2	83	2	93
3	92,5	3	77	3	82	3	75	3	77
4	90,5	4	77	4	76	4	78	4	73
5	90	5	84	5	77	5	73	5	75
6	86,5	6	90	6	91	6	72	6	75
7	89	7	86	7	66	7	77	7	75
8	88	8	66	8	81	8	82	8	87
9	77	9	69	9	84	9	79	9	79
10	79	10	95	10	65	10	88	10	92
11	87	11	82	11	85	11	88	11	80
12	85	12	89	12	87	12	86	12	77
13	86,5	13	87	13	72	13	90	13	81
14	78	14	93	Média	78	14	81	14	68
15	73	15	84	Des. Padrão	8,7	15	89	15	77
16	72	16	91			16	79	16	78
17	84	Média	83			17	87	17	76
18	79	Des. Padrão	8,6			18	75	18	75
19	53					19	83	19	74
20	66					20	82	Média	78
21	77					21	83	Des. Padrão	6,7
22	85					22	82		
23	90					23	79		
24	85					24	78		
25	82					Média	81		
26	83					Des. Padrão	5,0		
27	75								
28	76								
29	87								
30	82								
31	90								
32	72								
Média	81								
Des. Padrão	8,8								

Anexo A2 – Resultados detalhados dos ensaios físicos e mecânicos em laboratório

Resistência superficial por durômetro.

Tabela A2.1. Resultado em Shore A da resistência superficial por durômetro.

Provete	1	2	3	4	5	6	Média	Des. Padrão
RC 1.1	85	92	90	89	89	89	89	2,3
RC 1.2	92	92	85	82	90	89	88	4,0
RC 2.1	93	84	90	89			89	3,7
RC 2.2	88	89	90	91	85	92	89	2,5
SC 2.1	84	98	98	99	97	97	96	5,7
SC 2.2	99	92	96	98	98	88	95	4,3
SC 2.3	92	94	88	89	97	87	91	3,9
RDA 4	91	84	97	88	87		89	4,9
ROK 6	78	74	88	81	76	74	79	5,4
RNI 7	97	94	93	95	95	90	94	2,4
CBRC 11.1	84	76	80				80	4,0
CBRC 11.2	80	87	92				86	6,0
CBRC 12.1	69	80	68	73			73	5,4
BDA 3.1	95	97	97	97	98	99	97	1,3
BDA 3.2	96	92	89	88	96	94	93	3,4
BDA 3.3	96	90	95	96	99	93	95	3,1
BDA 3.4	95	97	95	93	94	98	95	1,9
BDA 3.5	97	96	96	99	98	95	97	1,5
BB 9.1	99	91	96	98	95	88	95	4,2
BB 9.2	97	96	91	96	99	96	96	2,6
BB 9.3	97	95	99	97	96	94	96	1,8
BB 9.4	98	98	98	99	97	97	98	0,8
BB 9.5	97	96	98	97	88	88	94	4,7
BB 9.6	98	98	94	97	97	98	97	1,5
BB 13.1	97	98	97	94	93	96	96	1,9
BB 13.2	93	99	98	98	97	97	97	2,1
BB 13.3	96	95	98	93	95	94	95	1,7
BB 13.4	97	95	98	93	98	93	96	2,3
BB 13.5	98	96	97	94	93	94	95	2,0
BB 13.6	97	97	91	96	97	95	96	2,3
BB 14.1	90	96	95	96	98	89	94	3,6
BB 14.2	91	96	92	96	98	95	95	2,7

Massa volúmica pelo método geométrico.

Tabela A2.2. Resultado da massa volúmica pelo método geométrico

Provete	Aresta A (m)	Média A(m)	Aresta B (m)	Média B(m)	Aresta C (m)	Média C (m)	M (kg)	Vol (m³)	M/Vol (kg/m³)
SC 2.2	0,06157	0,06133	0,06209	0,06235	0,05918	0,05812	0,442676	0,0002222	1991,82
	0,06132		0,06237		0,05890				
	0,06059		0,06280		0,05836				
	0,06102		0,06233		0,05716				
	0,06147		0,06255		0,05751				
	0,06203		0,06193		0,05762				
BDA 3.1	0,06680	0,06664	0,06087	0,06078	0,06298	0,06326	0,405261	0,000256	1581,69
	0,06647		0,06131		0,06290				
	0,06611		0,06098		0,06304				
	0,06685		0,06083		0,06324				
	0,06670		0,06034		0,06350				
	0,06691		0,06035		0,06389				
BDA 3.5	0,06779	0,06809	0,06069	0,06055	0,06355	0,06403	0,419632	0,000264	1589,81
	0,06746		0,06075		0,06412				
	0,06700		0,06150		0,06395				
	0,06857		0,06035		0,06428				
	0,06893		0,06015		0,06410				
	0,06876		0,05983		0,06419				
BB 9.3	0,06591	0,065137	0,07296	0,07264	0,06593	0,06532	0,506595	0,000309	1639,05
	0,06438		0,07303		0,06570				
	0,06386		0,07266		0,06585				
	0,06556		0,07213		0,06552				
	0,06559		0,07266		0,06482				
	0,06552		0,07242		0,06410				
BB 9.4	0,06480	0,064497	0,06462	0,06422	0,05766	0,06635	0,402711	0,000233	1725,55
	0,06414		0,06397		0,05662				
	0,06348		0,06352		0,05586				
	0,06409		0,06400		0,05533				
	0,06480		0,06446		0,05606				
	0,06567		0,06473		0,05656				
Provete	Aresta A (m)	Média A(m)	Aresta B (m)	Média B(m)	Aresta C (m)	Média C (m)	M (kg)	Vol (m³)	M/Vol (kg/m³)
BB 9.6	0,06653	0,06712	0,06192	0,06206	0,06179	0,06143	0,433016	0,000256	1692,31
	0,06654		0,06236		0,0616				
	0,06696		0,06254		0,06126				
	0,06738		0,06232		0,06106				
	0,06770		0,0617		0,06139				
	0,06758		0,06151		0,0615				
BB 13.2	0,06781	0,06743	0,06156	0,06073	0,06658	0,06557	0,43993	0,000269	1638,28
	0,06813		0,06134		0,06606				
	0,06786		0,06038		0,06495				
	0,06707		0,06121		0,06522				
	0,06675		0,06046		0,06529				
	0,06697		0,05945		0,06532				
BB 13.4	0,06403	0,06571	0,06634	0,06640	0,06621	0,06634	0,474866	0,000289	1640,53
	0,06503		0,06709		0,06646				
	0,06495		0,06597		0,06610				
	0,06729		0,06543		0,06596				
	0,06668		0,06627		0,06650				
	0,06625		0,06732		0,06683				
BB 14.1	0,06475	0,06501	0,06670	0,06703	0,06226	0,06188	0,421682	0,000270	1563,82
	0,06592		0,06722		0,06275				
	0,06393		0,06715		0,06286				
	0,06377		0,06671		0,06119				
	0,06560		0,06708		0,06109				
	0,06609		0,06734		0,06111				

Porosidade aberta, massa volúmica aparente e massa volúmica real

Tabela A2.3. Resultado de Porosidade aberta, massa volúmica aparente e massa volúmica real

Amostra	Provete	Pab (%)			Pb (kg/m ³)			pr (kg/m ³)		
		Value	MÉD	Dpad	Value	MÉD	Dpad	Value	MÉD	Dpad
RC 1	RC 1.1	12,7	11,6	1,6	2237	2285	69	2561	2584	32
	RC 1.2	10,5			2334			2607		
RC 2	RC 2.1	21,1	21,1		2002	2002		2538	2538	
SC 2	SC 2.1	16,6	14,9	2,4	1986	2067	114	2383	2428	64
	SC 2.2	13,2			2148			2474		
ROK 6	ROK 6	19,9	19,9		2091	2091		2611	2611	
RNI 7	RNI 7	15,4	15,4		1812	1812		2141	2141	
CBRC 11	CBRC 11.1	23,5	23,6	0,1	1879	1872	11	2458	2450	11
	CBRC 11.2	23,7			1864			2443		
CBRC 12	CBRC 12.1	25,1	25,6	0,7	1779	1775	5	2375	2387	17
	CBRC 12.2	26,1			1772			2399		
BDA 3	BDA 3.1	27,0	27,1	2,5	1677	1701	33	2298	2334	52
	BDA 3.2	27,3			1724			2370		
	BDA 3.3	23,3			1741			2269		
	BDA 3.5	29,3			1676			2371		
BB 9	BB 9.1	27,8	27,8	2,6	1736	1736	68	2406	2424	33
	BB 9.2	23,5			1878			2454		
	BB 9.3	26,5			1754			2387		
	BB 9.4	30,2			1721			2466		
	BB 9.5	29,4			1712			2424		
BB 13	BB 13.1	29,0	27,4	2,2	1678	1703	39	2365	2365	34
	BB 13.2	27,4			1703			2345		
	BB 13.3	27,0			1751			2398		
	BB 13.4	30,6			1671			2407		
	BB 13.6	24,7			1752			2328		
BB 14	BB 14.1	24,5	26,5	2,9	1798	1780	26	2381	2424	60
	BB 14.2	28,6			1762			2466		

Módulo de elasticidade.

Tabela A1.6. Resultado em MPa do módulo de elasticidade.

Provete	A (m)	A médio (m)	B (m)	B médio (m)	M (kg)	Ed (MPa)	Ed (MPa) médio	Ed (MPa) desv.pac
SC 2.2	0,06157	0,04075	0,06209	0,04160	0,44268	1206	1144,8	57,0
	0,06132		0,06237			1180		
	0,06059		0,06280			1104		
	0,06102		0,06233			1089		
BDA 3.1	0,06680	0,04437	0,06087	0,04067	0,40526	756	779,5	43,0
	0,06647		0,06131			740		
	0,06611		0,06098			838		
	0,06685		0,06083			784		
BDA 3.5	0,06779	0,04514	0,06069	0,04055	0,41963	740	810,0	65,3
	0,06746		0,06075			860		
	0,06700		0,06150			769		
	0,06857		0,06035			871		
BB 9.3	0,06591	0,04329	0,07296	0,04846	0,5066	806	804	21,3
	0,06438		0,07303			781		
	0,06386		0,07266			797		
	0,06556		0,07213			832		
BB 9.4	0,06480	0,04275	0,06462	0,04269	0,40271	894	931,5	26,3
	0,06414		0,06397			954		
	0,06348		0,06352			944		
	0,06409		0,06400			934		
BB 9.6	0,06653	0,04457	0,06192	0,04152	0,43302	1097	1062,5	122,4
	0,06654		0,06236			1000		
	0,06696		0,06254			1217		
	0,06738		0,06232			936		
BB 13.2	0,06781	0,04515	0,06156	0,04075	0,43993	1249	1035,3	154,6
	0,06813		0,06134			912		
	0,06786		0,06038			932		
	0,06707		0,06121			1048		
BB 13.4	0,06403	0,04355	0,06634	0,04414	0,47487	879	911,8	33,2
	0,06503		0,06709			949		
	0,06496		0,06597			889		
	0,06729		0,06543			930		
BB 14.1	0,06475	0,04306	0,06670	0,04463	0,42168	836	849	28,8
	0,06592		0,06722			878		
	0,06393		0,06715			815		
	0,06377		0,06671			867		

Velocidade de propagação por ultrassons.

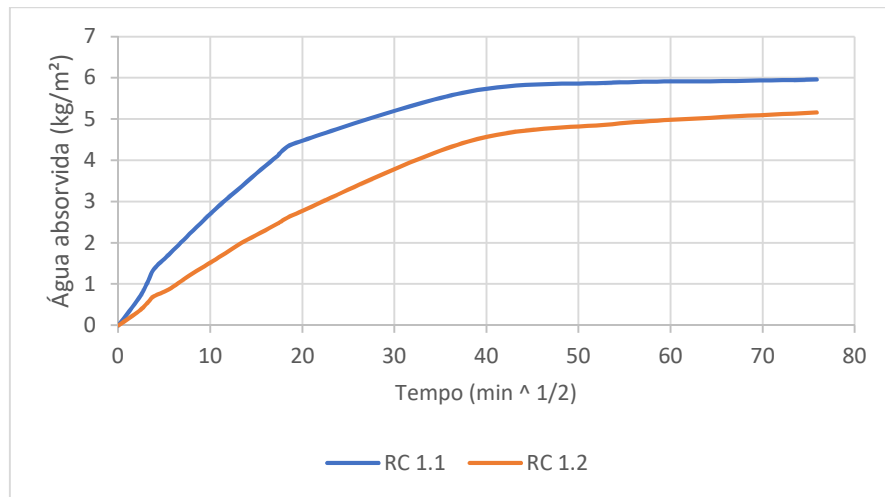
Tabela A1.7. Resultados em m/s da velocidade de propagação por ultrassons.

Distância	RC 1.1	RC 1.2	RC 2.1	RC 2.2	ROK 6	RNI 7	CBRC 11
0,07 m	972,22	909,09	897,44	921,05	1166,67	795,45	1076,92
0,07 m	666,67	897,44	945,95	1044,78	786,52	769,23	1044,78
0,07 m	1111,11	714,29	1014,49	833,33	945,95	833,33	1129,03
0,07 m	972,22	1093,75			707,07	769,23	1076,92
0,07 m	642,20	864,20			786,52	736,84	897,44
0,07 m	853,66	972,22			693,07	843,37	1000,00
0,10 m	1086,96	1315,79	1369,86	1315,79		952,38	
0,10 m	1449,28	1219,51	1075,27	1538,46		1190,48	
0,10 m	1265,82	1428,57	1428,57	1111,11		1351,35	
0,10 m	1282,05	1315,79				1369,86	
0,10 m	990,10	1612,90				1428,57	
0,10 m	1333,33	1204,82				1388,89	
MÉDIA	1038,53	1149,28	1044,88	1077,94	786,52	897,88	1060,85
DES. PAD	254,53	265,87	223,87	261,00	180,31	284,17	80,70

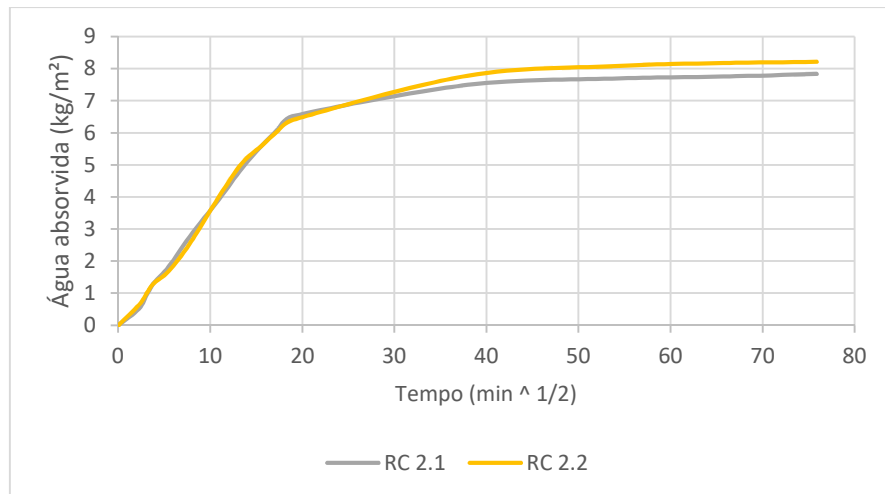
Absorção de água por capilaridade

Provete	0	5 min	10 min	15 min	30 min	60 min	120 min	180 min	240 min	300 min	360 min	24H	48H	72H	96H
RC 1.1	0,68473	0,691515	0,695321	0,698652	0,702176	0,707328	0,714283	0,719069	0,723165	0,726609	0,729517	0,742359	0,744604	0,745000	0,745379
RC 1.2	0,77022	0,773938	0,776072	0,777786	0,779541	0,783189	0,787886	0,791640	0,794242	0,796610	0,798814	0,817806	0,822341	0,82419	0,82534
RC 2.1	0,289230	0,291207	0,293040	0,294310	0,296252	0,299836	0,304308	0,307988	0,310584	0,312635	0,314220	0,317958	0,318714	0,31895	0,31925
RC 2.2	0,33765	0,340161	0,341734	0,342841	0,344315	0,347670	0,353498	0,357567	0,359659	0,361545	0,362912	0,368344	0,369516	0,36991	0,37005
SC 2.1	0,40063	0,415650	0,419510	0,422389	0,425615	0,426488	0,426849	0,427207	0,427242	0,427328	0,427566	0,429553	0,430633	0,43116	0,43126
SC 2.2	0,44251	0,453581	0,456230	0,458562	0,462487	0,466922	0,468137	0,468312	0,468459	0,468338	0,468419	0,469999	0,471058	0,47153	0,47178
SC 2.3	0,39646	0,410096	0,413690	0,417390	0,422348	0,423432	0,423756	0,423960	0,424080	0,423984	0,424285	0,425666	0,426725	0,42738	0,42768
ROK 6.1	0,1616	0,169509	0,171607	0,172920	0,175478	0,177820	0,178820	0,178955	0,179332	0,179278	0,179370	0,180276	0,180721	0,18105	0,18083
RNI 7.1	0,34847	0,360270	0,363782	0,366474	0,370421	0,375875	0,380369	0,381868	0,382512	0,382859	0,383144	0,386290	0,387441	0,38806	0,38833
CBRC 11.1	0,164550	0,175591	0,174680	0,182083	0,183431	0,184030	0,184030	0,184208	0,184273	0,184361	0,184446	0,185424	0,185818	0,18604	0,18575
CBRC 11.2	0,057	0,061518	0,062872	0,063747	0,063444	0,063623	0,063636	0,063726	0,063772	0,063810	0,063860	0,064295	0,064418	0,06473	0,06458
CBRC 12.1	0,04422	0,0498	0,04992	0,050350	0,049730	0,0498	0,04984	0,04992	0,04991	0,04999	0,05003	0,05044	0,050750	0,05102	0,05091
CBRC 12.2	0,029460	0,0334	0,03351	0,03391	0,03328	0,033400	0,03336	0,03342	0,033470	0,03355	0,033510	0,03383	0,03403	0,03427	0,0342
BDA 3.1	0,40826	0,416393	0,418305	0,419631	0,422100	0,425532	0,430699	0,434459	0,437824	0,440575	0,443400	0,477324	0,481567	0,48229	0,48265
BDA 3.2	0,39859	0,406781	0,409180	0,411015	0,414211	0,418365	0,424273	0,428567	0,432318	0,435305	0,438290	0,468106	0,469370	0,46998	0,47034
BDA 3.3	0,46546	0,476990	0,479146	0,481529	0,486197	0,493270	0,504290	0,512949	0,520179	0,526285	0,531842	0,546760	0,547739	0,54825	0,548620
BDA 3.4	0,41792	0,426409	0,428940	0,430882	0,434663	0,440370	0,449449	0,456728	0,463002	0,468191	0,473173	0,490062	0,491003	0,49159	0,49194
BDA 3.5	0,424647	0,436060	0,439153	0,441457	0,445864	0,452589	0,461843	0,468584	0,474367	0,478851	0,482962	0,496641	0,497659	0,498190	0,498553
BB 9.1	0,43087	0,451220	0,455330	0,458739	0,465472	0,476044	0,488079	0,495793	0,500719	0,501780	0,502267	0,505012	0,506647	0,50764	0,50829
BB 9.2	0,455510	0,476275	0,482248	0,487711	0,496909	0,511519	0,526884	0,531150	0,532026	0,532193	0,532507	0,535414	0,537258	0,53849	0,53924
BB 9.3	0,50693	0,524954	0,530266	0,534406	0,542393	0,555981	0,579404	0,586777	0,587252	0,587307	0,587660	0,590620	0,592450	0,59356	0,5942
BB 9.4	0,403450	0,419974	0,423922	0,427088	0,433370	0,443532	0,457312	0,458096	0,454800	0,458533	0,458770	0,460976	0,462343	0,46319	0,46355
BB 9.5	0,39649	0,414424	0,418221	0,421713	0,428260	0,438922	0,456582	0,457983	0,458368	0,458379	0,458636	0,461040	0,462393	0,46326	0,46373
BB 9.6	0,43392	0,448638	0,453210	0,457130	0,465074	0,476920	0,496716	0,497206	0,497586	0,497614	0,497860	0,500284	0,501727	0,502580	0,502899
BB 13.1	0,4433	0,46073	0,46574	0,46957	0,47696	0,48932	0,5047	0,51234	0,513760	0,51433	0,51459	0,51696	0,51858	0,519650	0,520064
BB 13.2	0,43996	0,45138	0,45501	0,45826	0,46452	0,47615	0,49344	0,50509	0,508510	0,508960	0,509200	0,51139	0,51287	0,51384	0,514190
BB 13.3	0,45493	0,47704	0,48188	0,48539	0,49126	0,50104	0,51466	0,52352	0,52584	0,52641	0,52671	0,52916	0,53065	0,53171	0,53221
BB 13.4	0,47709	0,49535	0,50179	0,50701	0,51648	0,5307	0,54608	0,55115	0,55169	0,551980	0,55219	0,5546	0,5561	0,55711	0,55744
BB 13.5	0,34524	0,36275	0,3674	0,37105	0,37815	0,39001	0,40129	0,40217	0,40234	0,40256	0,405710	0,40435	0,40545	0,40621	0,406490
BB 13.6	0,39526	0,41479	0,419710	0,42342	0,4297	0,43912	0,449890	0,4559	0,45671	0,45702	0,45725	0,459310	0,46068	0,46148	0,4618
BB 14.1	0,421850	0,44207	0,4484	0,453880	0,46362	0,48015	0,49184	0,49223	0,49265	0,49283	0,49303	0,49543	0,49698	0,49797	0,49846
BB 14.2	0,48086	0,50144	0,50837	0,51435	0,52509	0,540780	0,55771	0,56017	0,56062	0,56077	0,5611	0,56368	0,56522	0,566280	0,566935

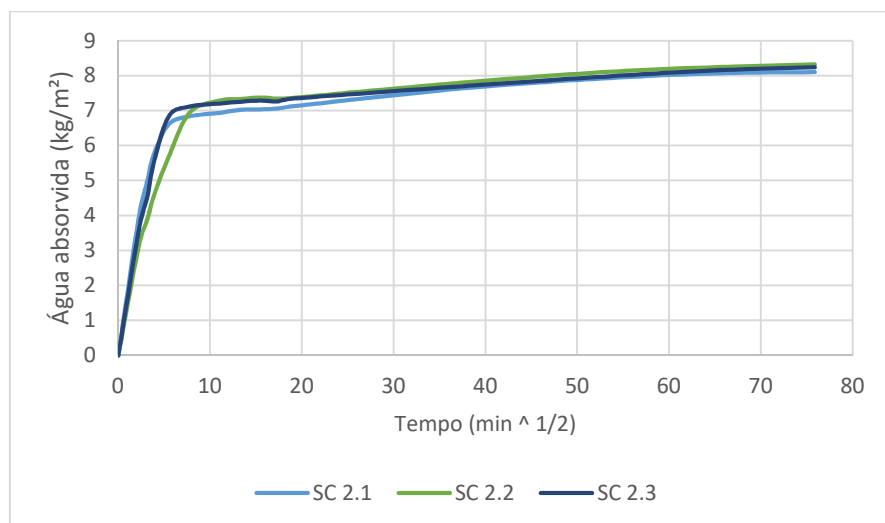
Resultados capilaridade da amostra RC 1



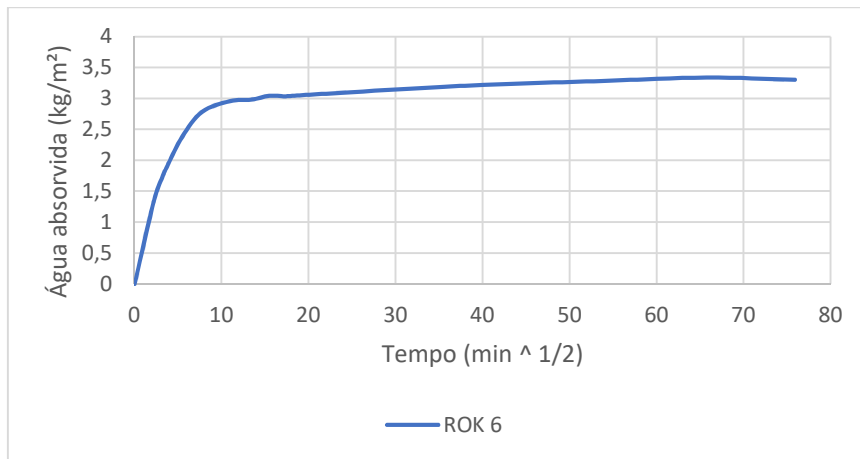
Resultados capilaridade da amostra RC 2



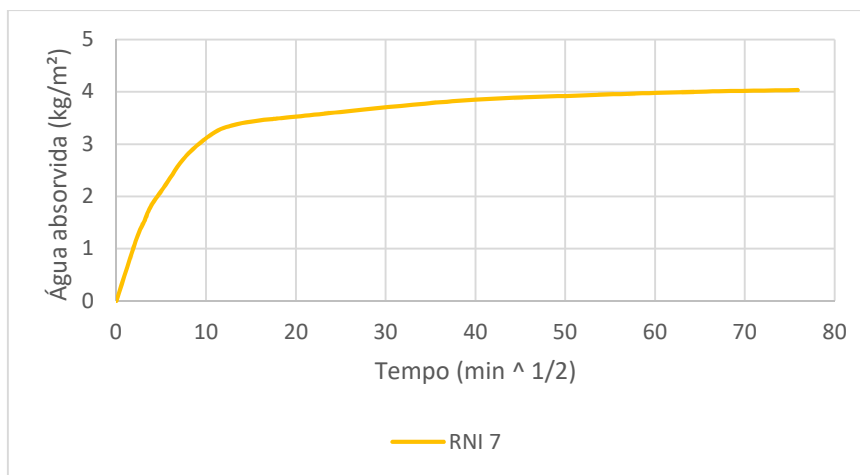
Resultados capilaridade da amostra SC 2



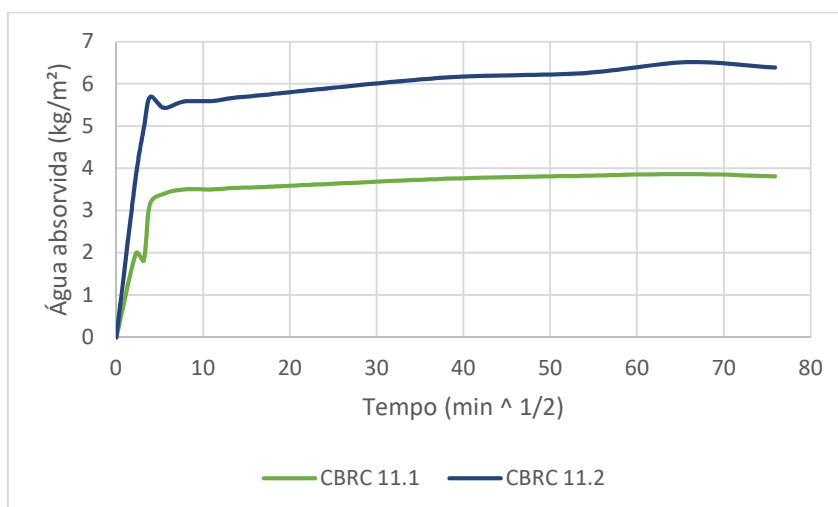
Resultados capilaridade da amostra ROK 6



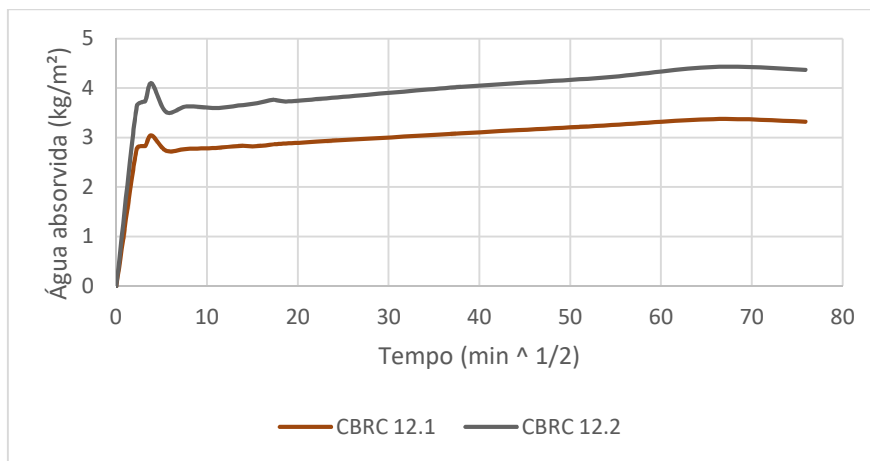
Resultados capilaridade da amostra RNI 7



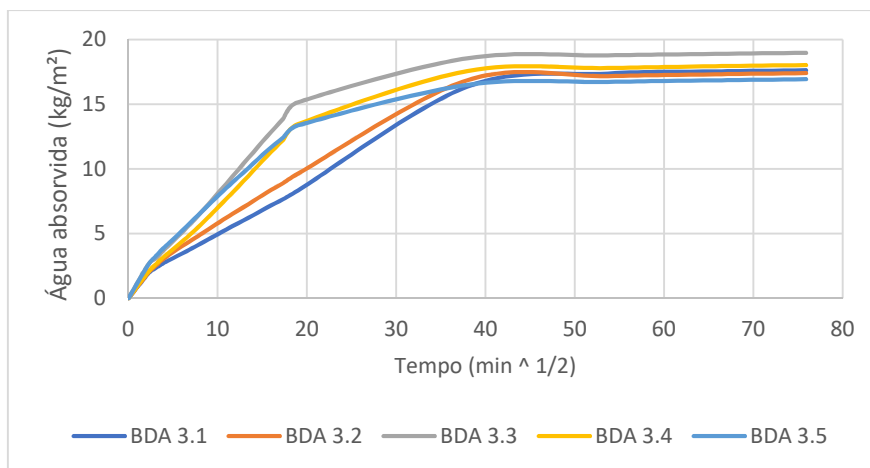
Resultados capilaridade da amostra CBRC 11



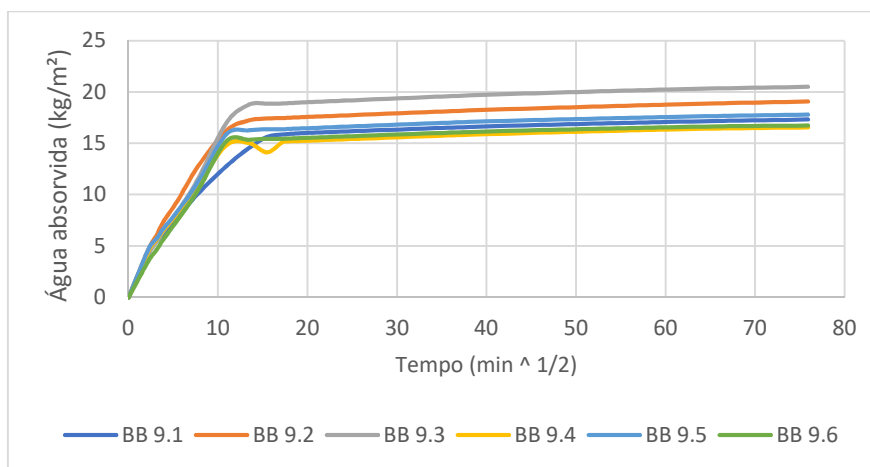
Resultados capilaridade da amostra CBRC 12



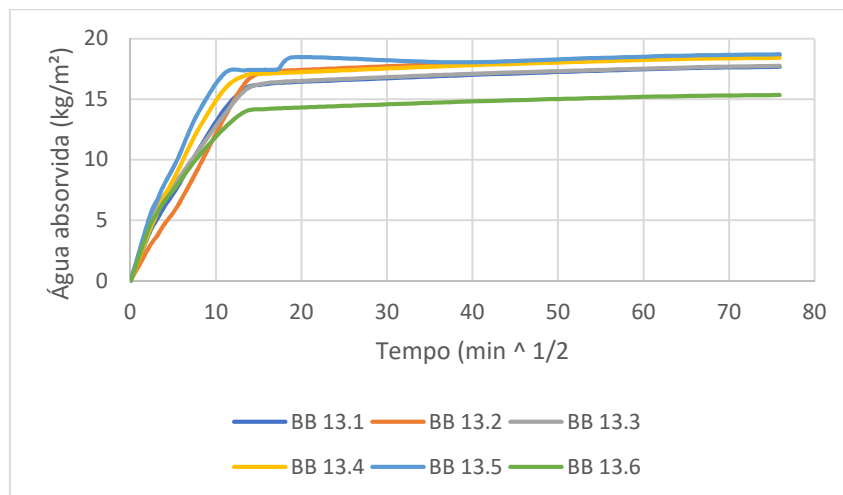
Resultados capilaridade da amostra BDA 3



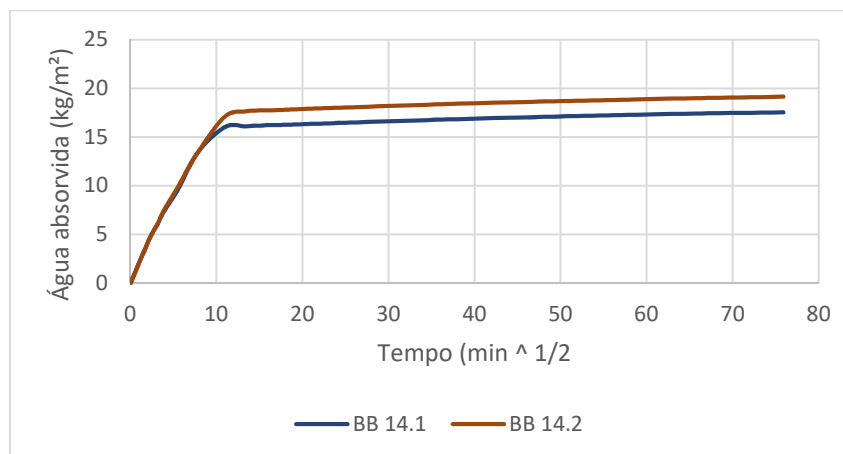
Resultados capilaridade da amostra BB 9



Resultados capilaridade da amostra BB 13



Resultados capilaridade da amostra BB 14

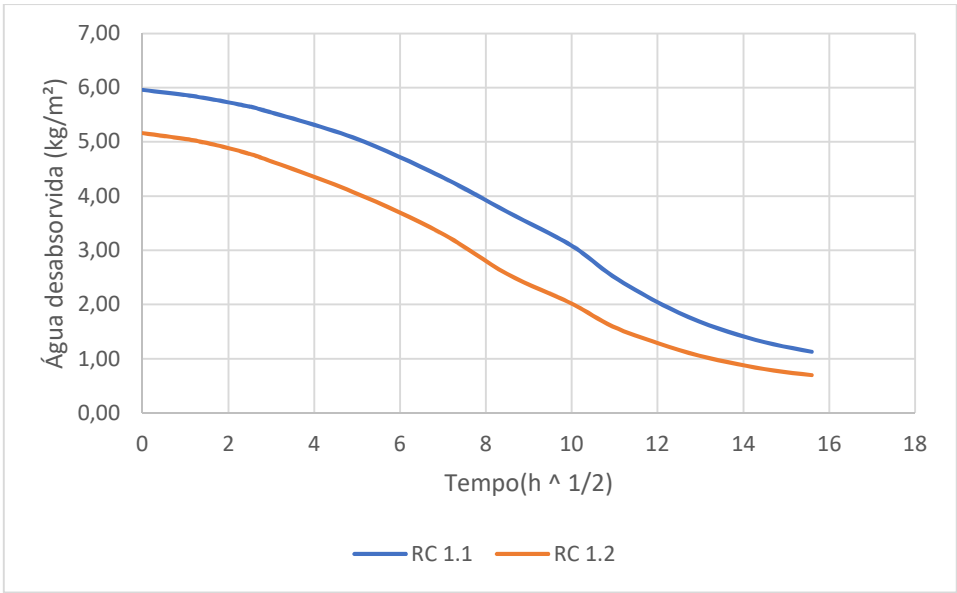
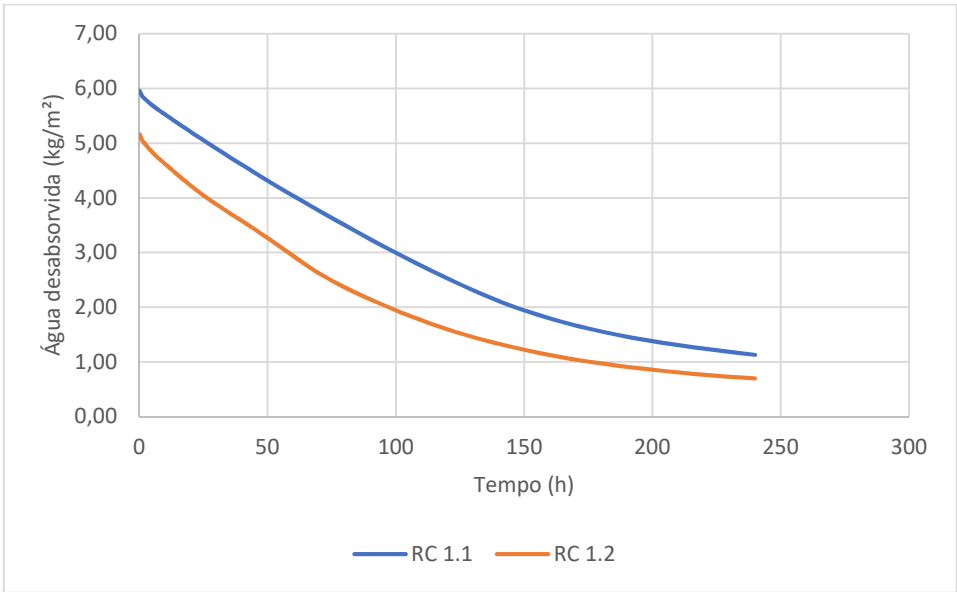


Secagem

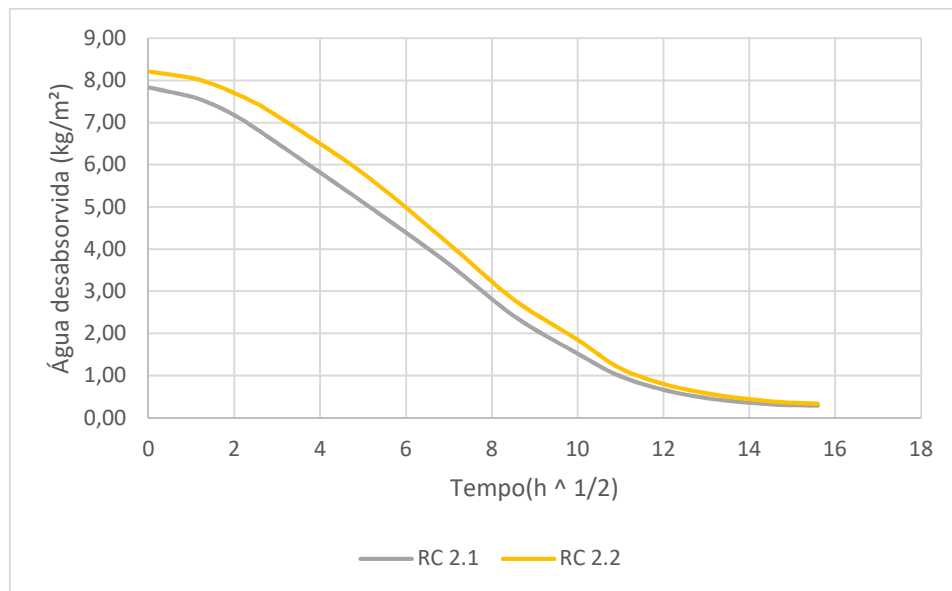
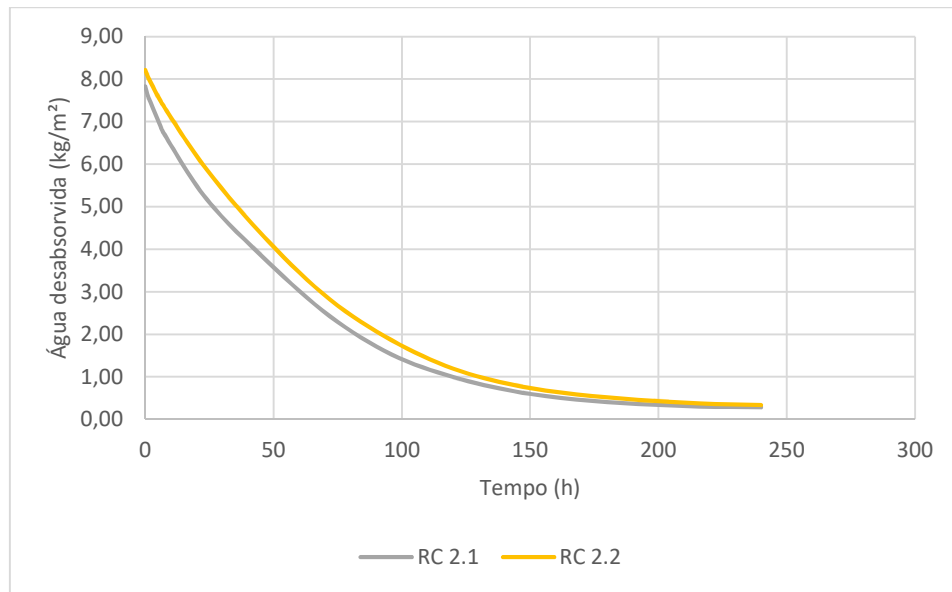
Amostra	0	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	24h	25h	29h	30h	48h	72h
RC 1.1	0,745379	0,744420	0,743890	0,743458	0,743039	0,742666	0,742308	0,741941	0,736451	0,736098	0,734770	0,734413	0,729210	0,722505
RC 1.2	0,825338	0,824186	0,823547	0,822951	0,822377	0,821860	0,821325	0,820842	0,813769	0,813241	0,811456	0,811036	0,805781	0,797624
RC 2.1	0,319254	0,318415	0,317841	0,317277	0,316719	0,316175	0,315637	0,315111	0,309065	0,308587	0,306777	0,306417	0,303395	0,298536
RC 2.2	0,370045	0,369435	0,368960	0,368492	0,368010	0,367579	0,367161	0,366752	0,360801	0,360385	0,358857	0,358480	0,354148	0,348766
SC 2.1	0,431264	0,430607	0,430167	0,429742	0,429305	0,428905	0,428502	0,428107	0,421233	0,420816	0,419120	0,418621	0,407670	0,402310
SC 2.2	0,471781	0,471002	0,470488	0,469999	0,469467	0,468982	0,468505	0,468033	0,460286	0,459807	0,457817	0,457271	0,447402	0,444190
SC 2.3	0,427678	0,426815	0,426252	0,425717	0,425131	0,424584	0,424073	0,423540	0,415119	0,414580	0,412387	0,411804	0,402648	0,398416
ROK 6.1	0,180829	0,180403	0,180190	0,179978	0,179750	0,179327	0,179086	0,178881	0,175404	0,175180	0,174279	0,174053	0,170218	0,164603
RNI 7.1	0,388326	0,387166	0,386670	0,386140	0,385613	0,385116	0,384611	0,384135	0,376928	0,376423	0,374628	0,374171	0,368301	0,359931
CBRC 11.1	0,185752	0,185415	0,185195	0,184887	0,184594	0,184317	0,184038	0,183765	0,179951	0,179675	0,178732	0,178485	0,175790	0,171614
CBRC 11.2	0,064577	0,064406	0,064294	0,064154	0,064015	0,063886	0,063751	0,063629	0,061857	0,061733	0,061301	0,061177	0,059763	0,058046
CBRC 12.1	0,050909	0,050636	0,050495	0,050358	0,050202	0,050043	0,049879	0,049722	0,047633	0,047477	0,046952	0,046807	0,045439	0,044306
CBRC 12.2	0,034202	0,033917	0,033797	0,033647	0,033494	0,033352	0,033209	0,033065	0,031289	0,031152	0,030661	0,030528	0,029504	0,029427
BDA 3.1	0,482652	0,481802	0,481211	0,480640	0,480085	0,479587	0,479086	0,478593	0,469290	0,468773	0,466692	0,466174	0,456646	0,444592
BDA 3.2	0,470335	0,469523	0,468972	0,468467	0,467934	0,467464	0,467012	0,466576	0,458528	0,458055	0,456103	0,455652	0,446951	0,435155
BDA 3.3	0,548620	0,547626	0,547035	0,546447	0,545862	0,545304	0,544748	0,544219	0,535153	0,534582	0,532265	0,531711	0,521501	0,507342
BDA 3.4	0,491942	0,491100	0,490503	0,489920	0,489322	0,488753	0,488196	0,487648	0,478815	0,478253	0,475985	0,475416	0,465520	0,451806
BDA 3.5	0,498553	0,497689	0,497046	0,496365	0,495667	0,494999	0,494336	0,493694	0,483202	0,482540	0,479942	0,479268	0,467981	0,454387
BB 9.1	0,508287	0,507525	0,507048	0,506553	0,506037	0,505550	0,505064	0,504585	0,496111	0,495596	0,493369	0,493067	0,483207	0,468897
BB 9.2	0,539238	0,538399	0,537893	0,537349	0,536828	0,536298	0,535779	0,535270	0,526589	0,526045	0,523922	0,523381	0,513215	0,498302
BB 9.3	0,594201	0,593189	0,592540	0,591888	0,591225	0,590602	0,589988	0,589373	0,579301	0,578650	0,576150	0,575493	0,563828	0,546661
BB 9.4	0,463552	0,462758	0,462150	0,461508	0,460865	0,460244	0,459636	0,459038	0,449767	0,449155	0,446776	0,446157	0,435568	0,421420
BB 9.5	0,463732	0,462975	0,462444	0,461894	0,461330	0,460800	0,460273	0,459762	0,450961	0,450420	0,448292	0,447758	0,438099	0,424183
BB 9.6	0,502899	0,502178	0,501631	0,501043	0,500469	0,499929	0,499374	0,498855	0,490101	0,489552	0,487411	0,486863	0,477036	0,462741
BB 13.1	0,520064	0,519170	0,518517	0,517823	0,517235	0,516652	0,516071	0,515499	0,506132	0,505601	0,503310	0,502739	0,492540	0,479698
BB 13.2	0,514190	0,513346	0,512627	0,511888	0,511273	0,510690	0,510104	0,509511	0,500346	0,499781	0,497423	0,496848	0,487108	0,474494
BB 13.3	0,532205	0,531412	0,530823	0,530227	0,529657	0,529108	0,528556	0,528002	0,517808	0,517271	0,514850	0,514262	0,504100	0,490199
BB 13.4	0,557441	0,556667	0,556012	0,555380	0,554772	0,554191	0,553608	0,553008	0,542916	0,542315	0,539993	0,539376	0,528257	0,512303
BB 13.5	0,406490	0,405824	0,405268	0,404753	0,404241	0,403759	0,403269	0,402779	0,393564	0,393050	0,390932	0,390379	0,380066	0,365977
BB 13.6	0,461801	0,461029	0,460381	0,459810	0,459242	0,458686	0,458139	0,457591	0,447393	0,446826	0,444912	0,444268	0,431883	0,416282
BB 14.1	0,498458	0,497615	0,497074	0,496480	0,495909	0,495359	0,494806	0,494270	0,485415	0,484873	0,482649	0,482072	0,471988	0,457238
BB 14.2	0,566935	0,565912	0,565116	0,564311	0,563502	0,562728	0,561954	0,561196	0,549398	0,548649	0,545714	0,544933	0,531597	0,512712

Amostra	96h	120h	144h	168H	192H	216H	240H
RC 1.1	0,716215	0,710452	0,705520	0,701940	0,699434	0,697628	0,696227
RC 1.2	0,791835	0,787288	0,783995	0,781546	0,779871	0,778600	0,777690
RC 2.1	0,295095	0,293066	0,291770	0,291041	0,290639	0,290411	0,290330
RC 2.2	0,344999	0,342365	0,340822	0,339981	0,339466	0,339144	0,338977
SC 2.1	0,401183	0,400731	0,400621	0,400608	0,400608	0,400606	0,400626
SC 2.2	0,443331	0,442816	0,442563	0,442489	0,442478	0,442481	0,442494
SC 2.3	0,397360	0,396834	0,396627	0,396574	0,396570	0,396568	0,396580
ROK 6.1	0,162184	0,161639	0,161537	0,161510	0,161510	0,161510	0,161524
RNI 7.1	0,353090	0,350393	0,349345	0,349012	0,348918	0,348897	0,348920
CBRC 11.1	0,168111	0,165696	0,164637	0,164320	0,164274	0,164268	0,164270
CBRC 11.2	0,057245	0,057035	0,057011	0,057004	0,057000	0,056998	0,057003
CBRC 12.1	0,044234	0,044198	0,044185	0,044176	0,044174	0,044176	0,044177
CBRC 12.2	0,029410	0,029379	0,029367	0,029361	0,029361	0,029362	0,029361
BDA 3.1	0,435531	0,429776	0,425890	0,423233	0,421620	0,420543	0,419926
BDA 3.2	0,425724	0,418947	0,414842	0,412220	0,410679	0,409646	0,409136
BDA 3.3	0,496633	0,488914	0,484447	0,481662	0,479975	0,478777	0,478159
BDA 3.4	0,442568	0,436679	0,433432	0,431793	0,430439	0,429534	0,428987
BDA 3.5	0,446512	0,442093	0,439775	0,438335	0,437237	0,436424	0,435916
BB 9.1	0,455081	0,445619	0,440841	0,438175	0,436570	0,435539	0,434969
BB 9.2	0,483843	0,472243	0,466677	0,463653	0,461857	0,460606	0,459842
BB 9.3	0,531548	0,527732	0,518343	0,515768	0,513979	0,512687	0,511788
BB 9.4	0,414828	0,411460	0,409427	0,408150	0,407219	0,406580	0,406174
BB 9.5	0,412537	0,406015	0,402854	0,401058	0,399959	0,399222	0,398767
BB 9.6	0,452012	0,446354	0,443183	0,441168	0,439868	0,438929	0,438272
BB 13.1	0,468782	0,460687	0,455082	0,451524	0,449335	0,447948	0,447111
BB 13.2	0,464516	0,456447	0,450836	0,447591	0,445651	0,444413	0,443686
BB 13.3	0,479362	0,471693	0,466637	0,463420	0,461441	0,460202	0,459493
BB 13.4	0,499298	0,492105	0,487899	0,485370	0,483759	0,482718	0,482104
BB 13.5	0,357198	0,353313	0,351081	0,349789	0,349072	0,348673	0,348548
BB 13.6	0,407659	0,403984	0,401484	0,399969	0,399074	0,398563	0,398338
BB 14.1	0,442932	0,433966	0,430081	0,428004	0,426477	0,425491	0,424895
BB 14.2	0,498483	0,492205	0,489065	0,486837	0,485335	0,484367	0,483804

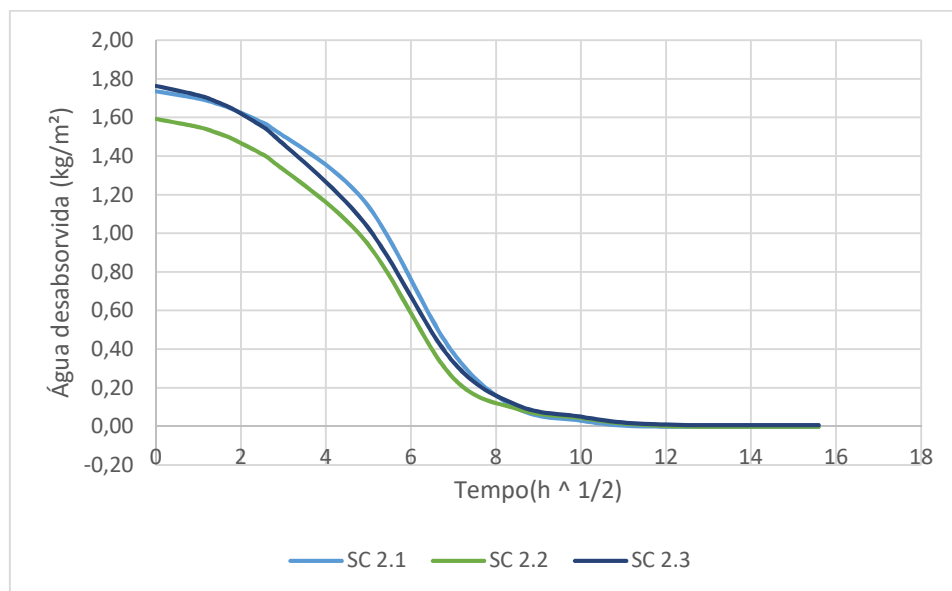
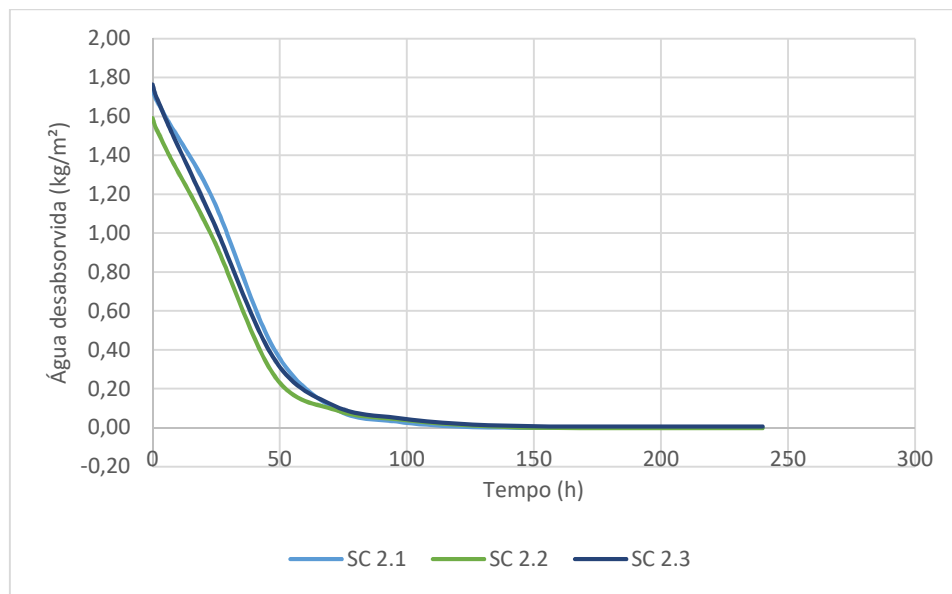
Resultados secagem da amostra RC 1



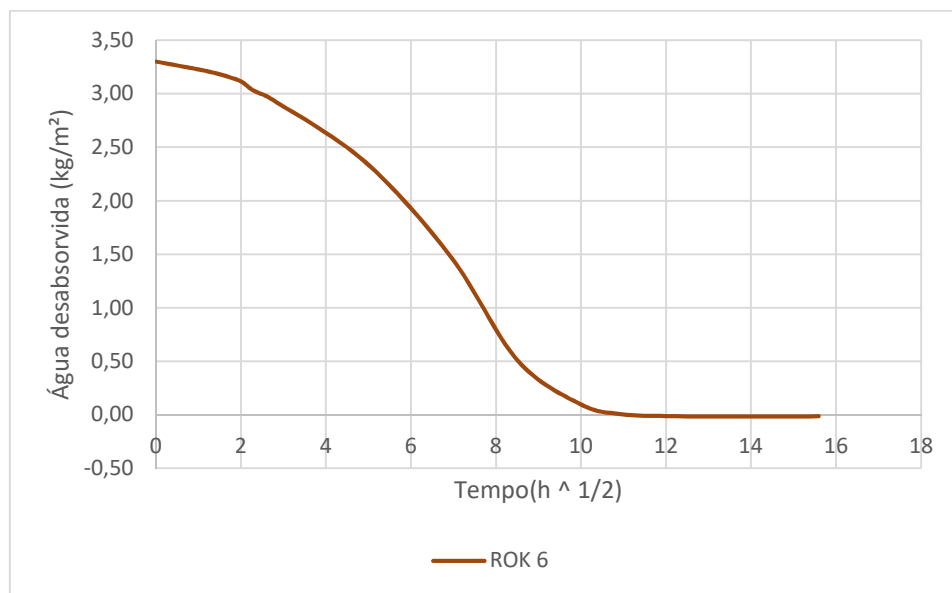
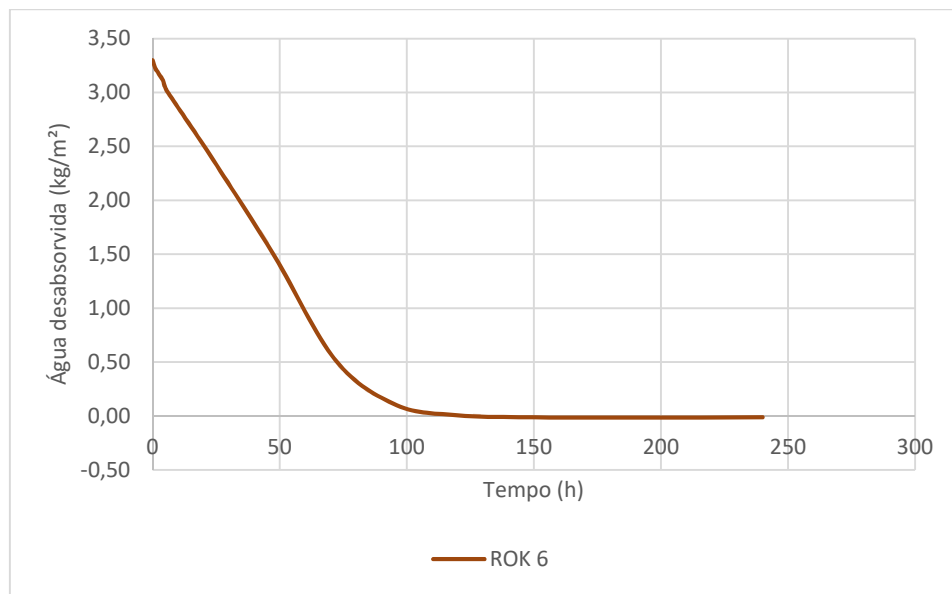
Resultados secagem da amostra RC 2



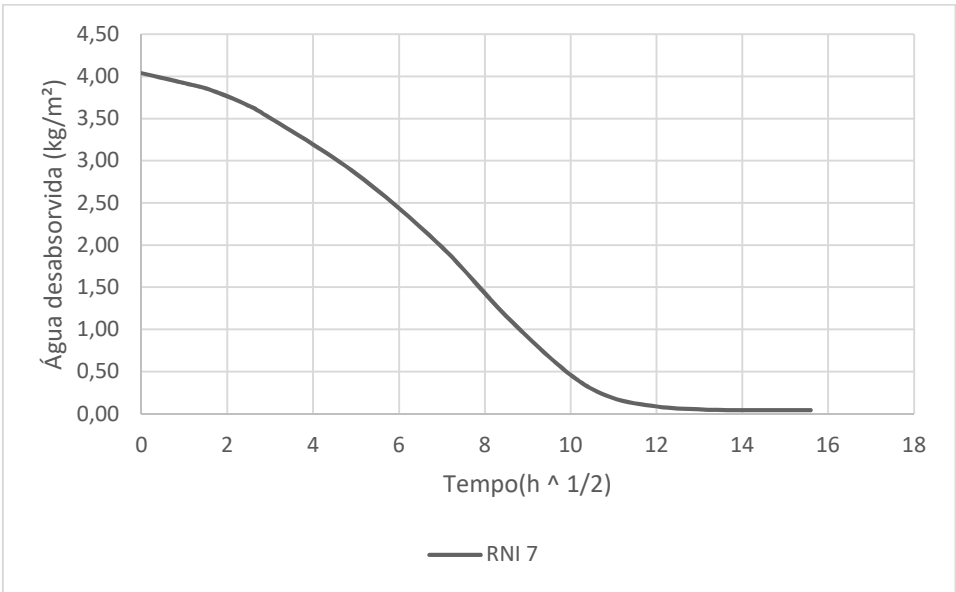
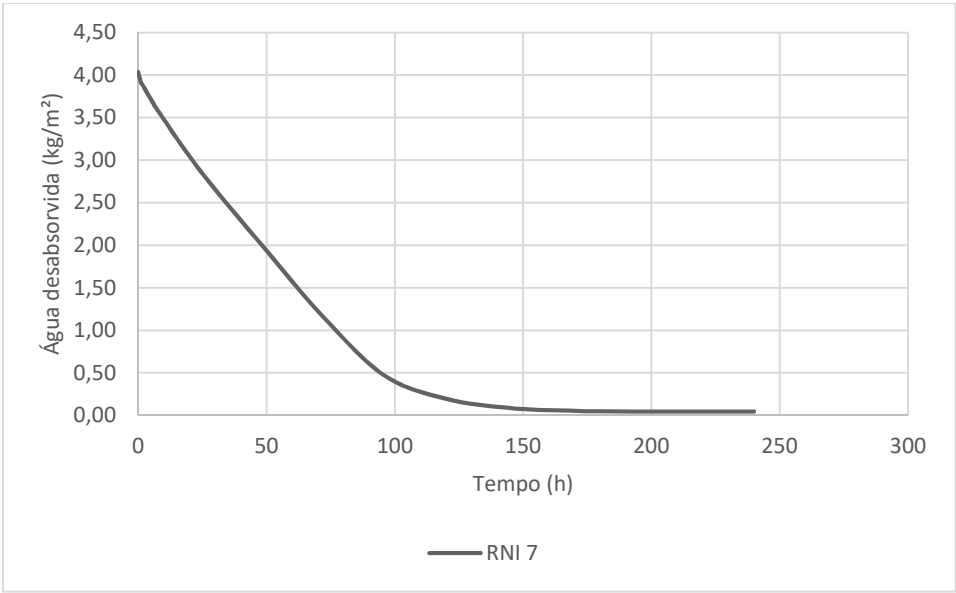
Resultados secagem da amostra SC 2



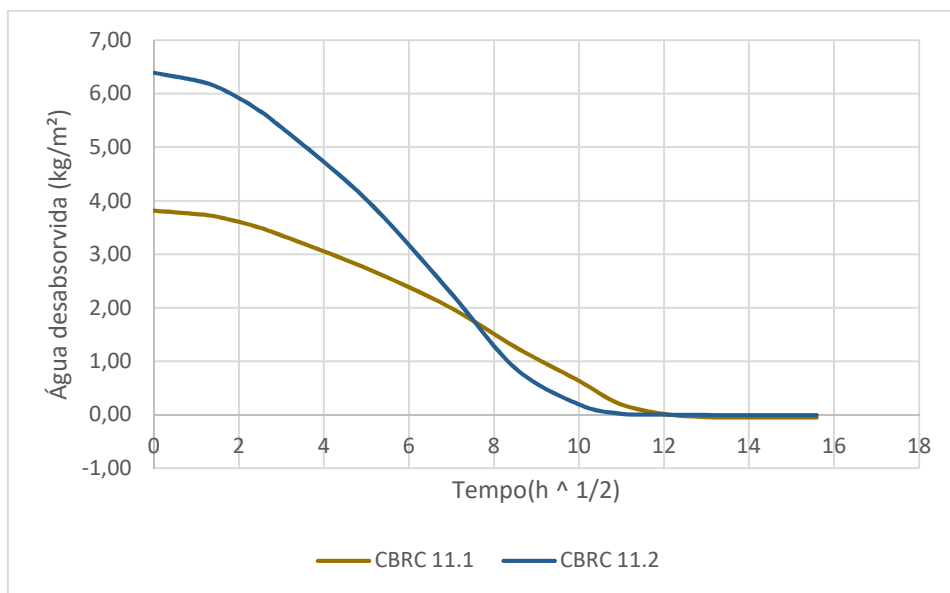
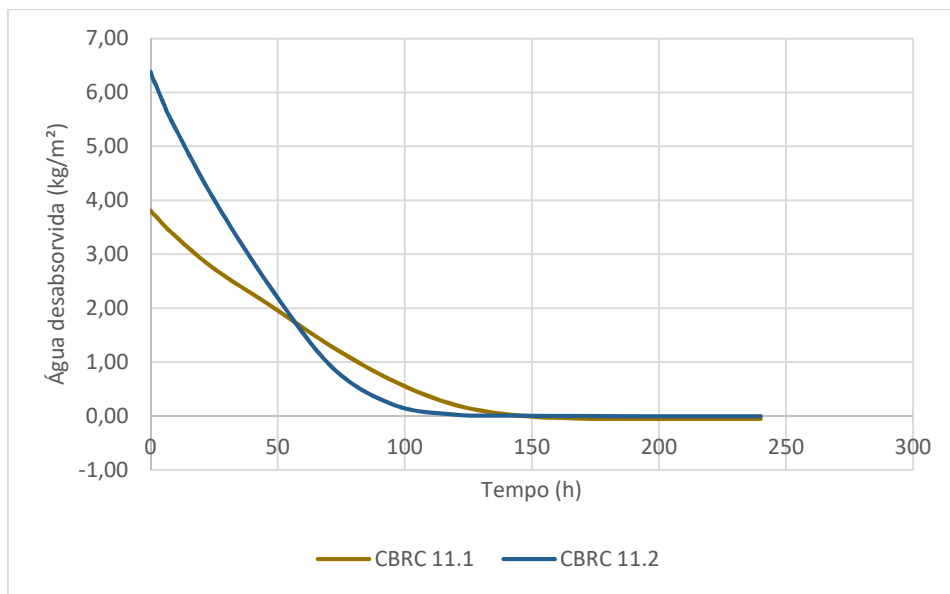
Resultados secagem da amostra ROK 6



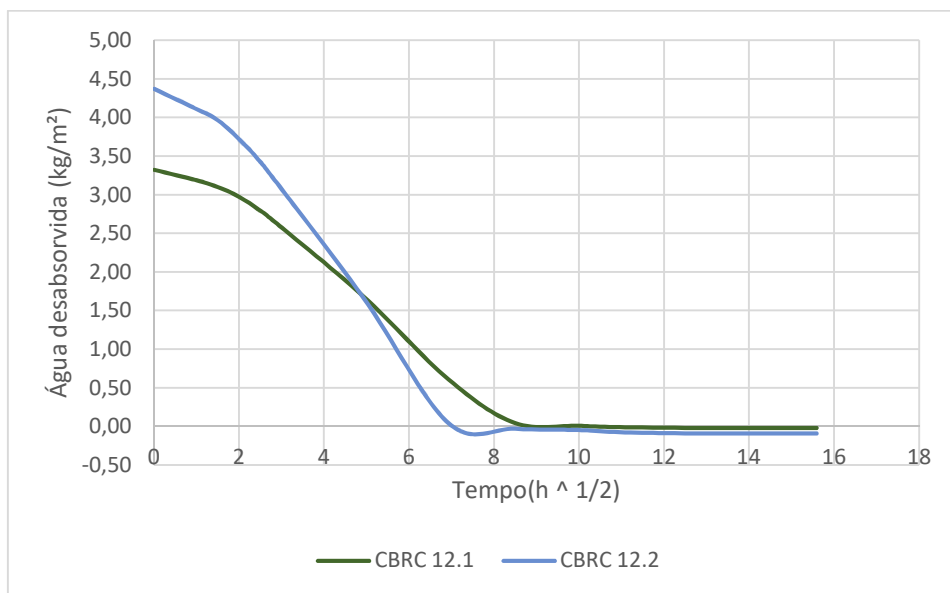
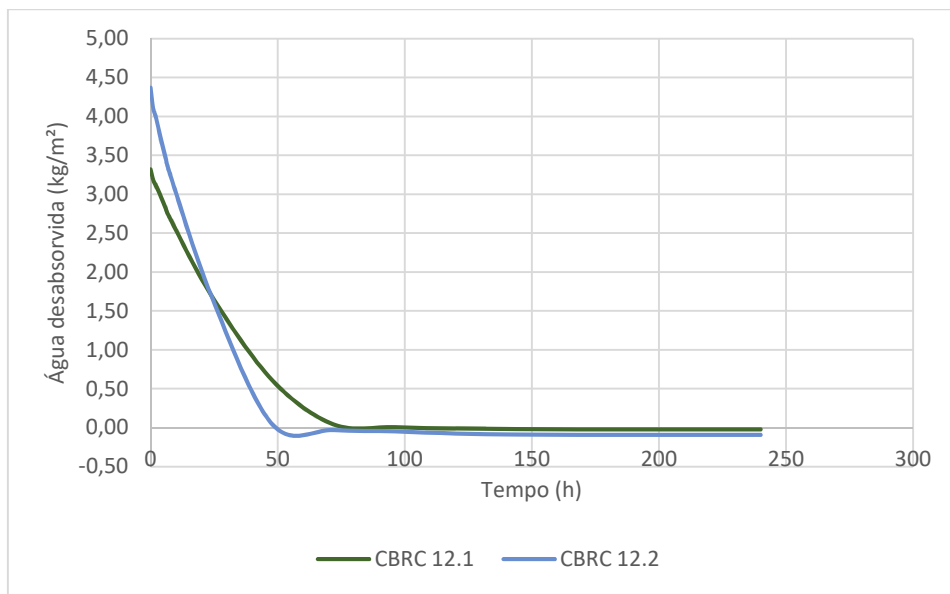
Resultados secagem da amostra RNI 7



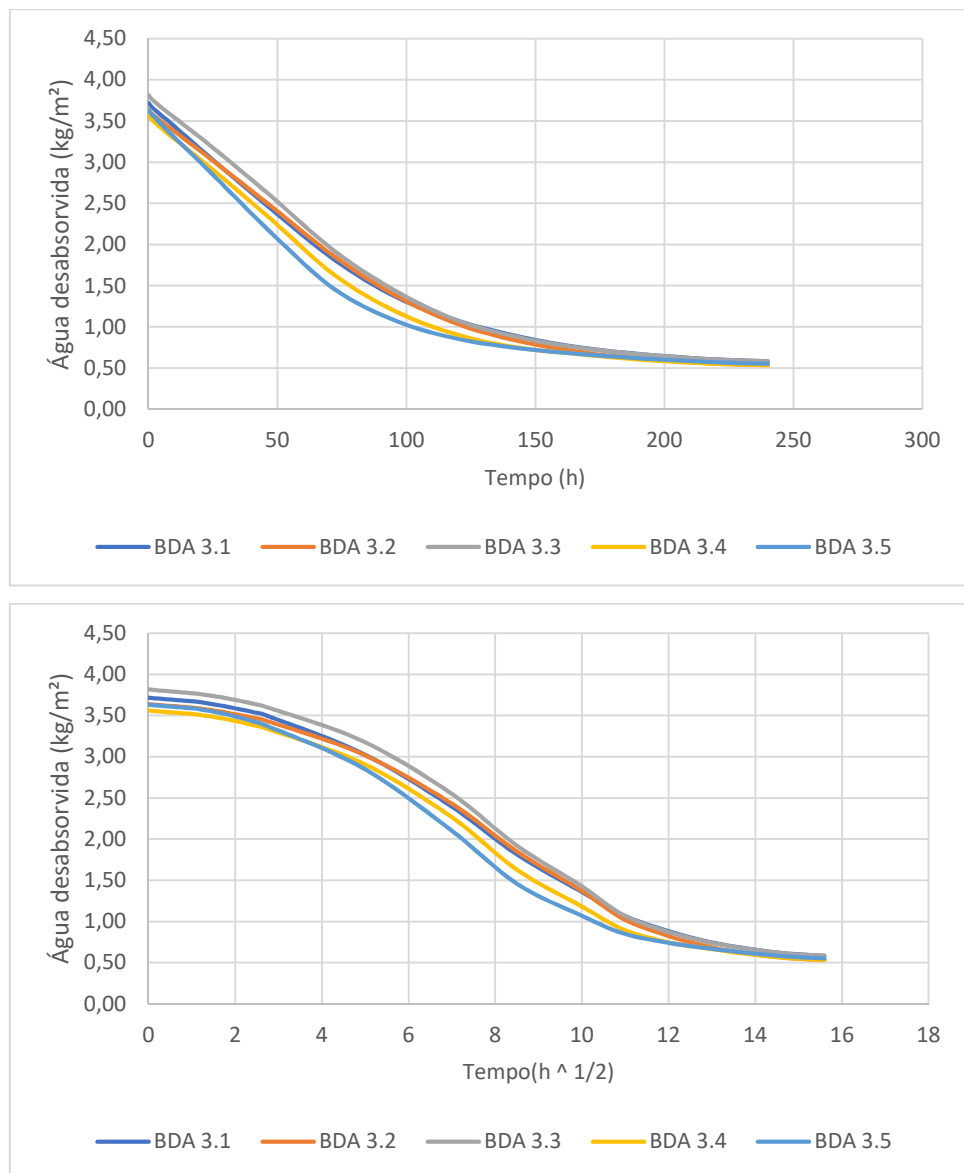
Resultados secagem da amostra CBRC 11



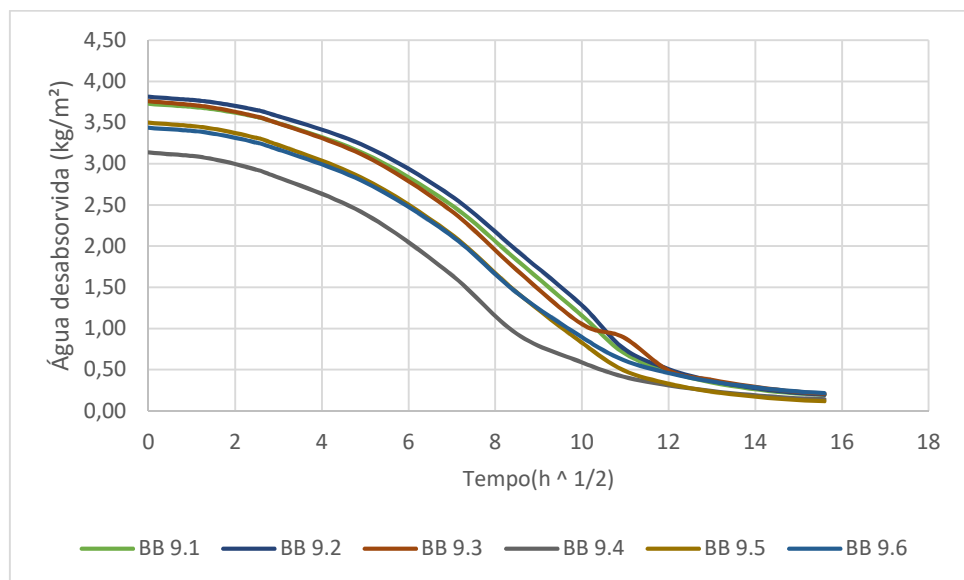
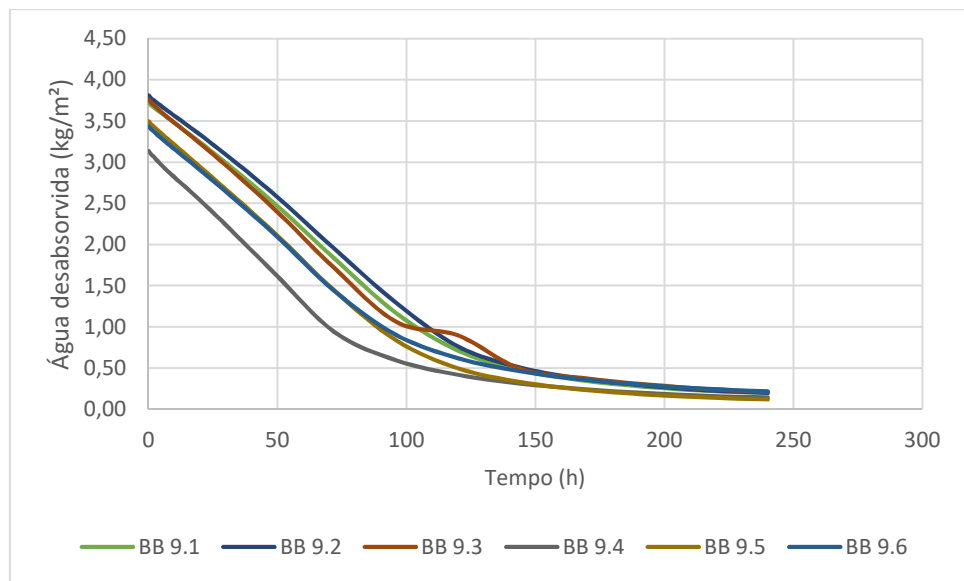
Resultados secagem da amostra CBRC 12



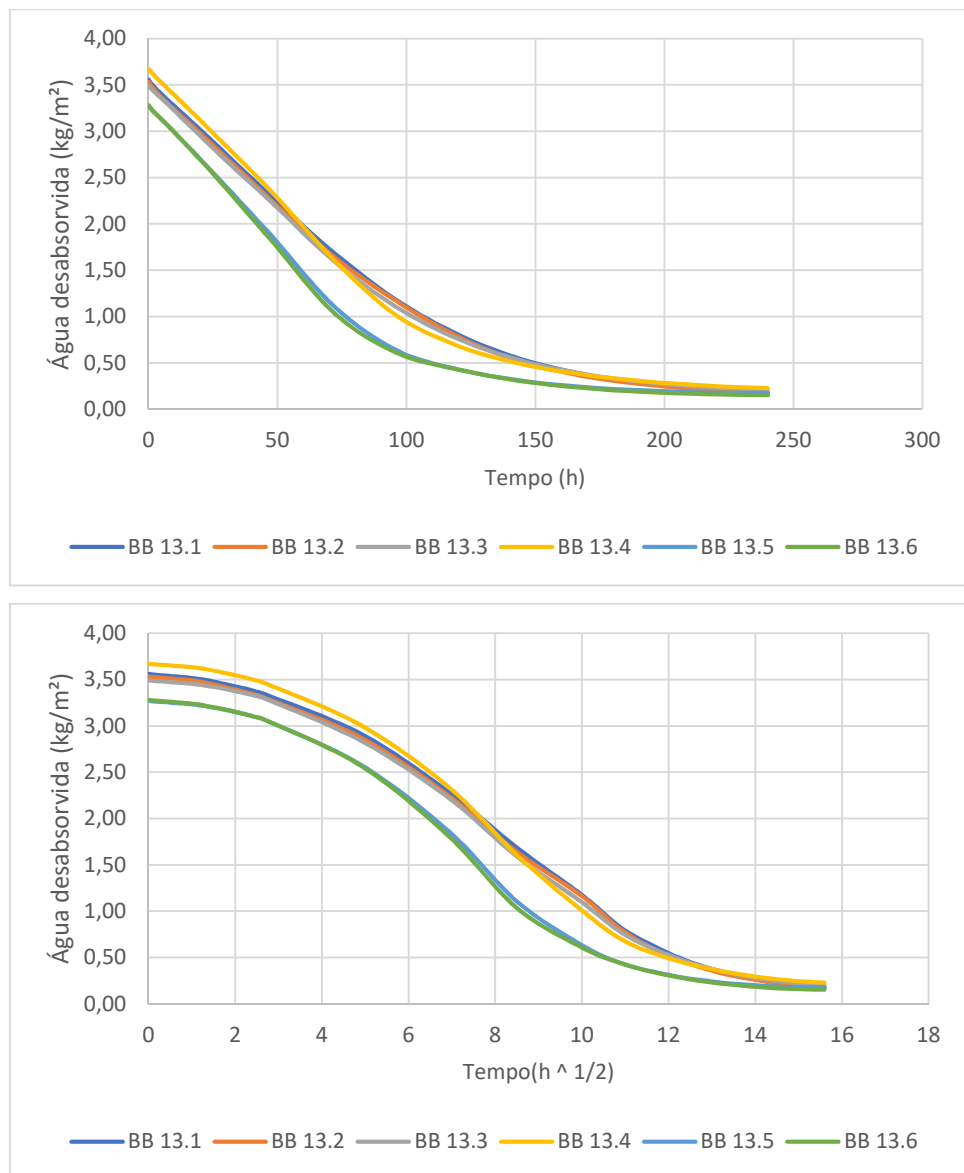
Resultados secagem da amostra BDA 3



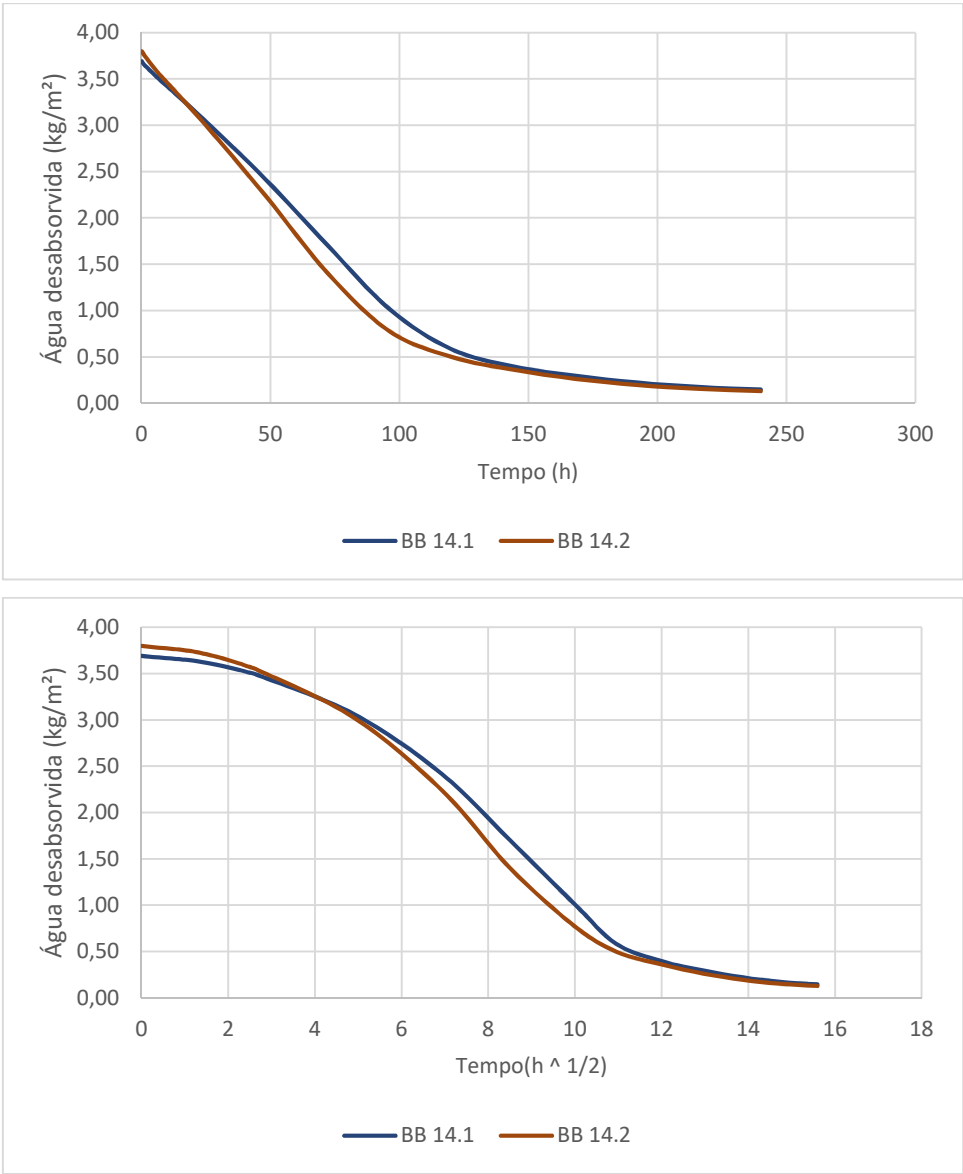
Resultados secagem da amostra BB 9



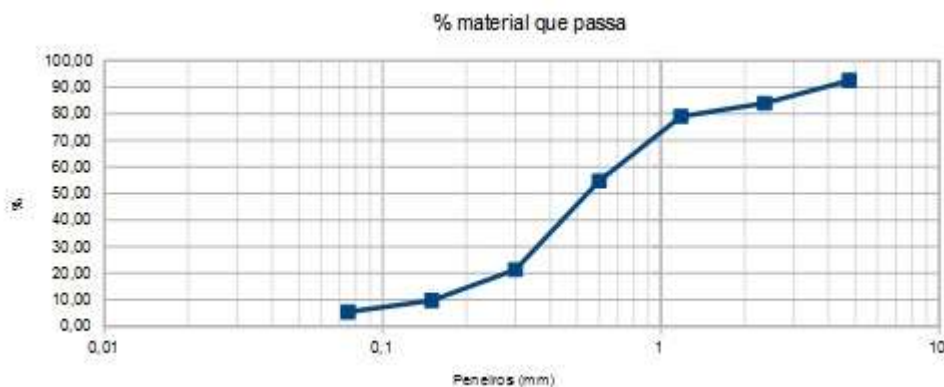
Resultados secagem da amostra BB 13



Resultados secagem da amostra BB 14



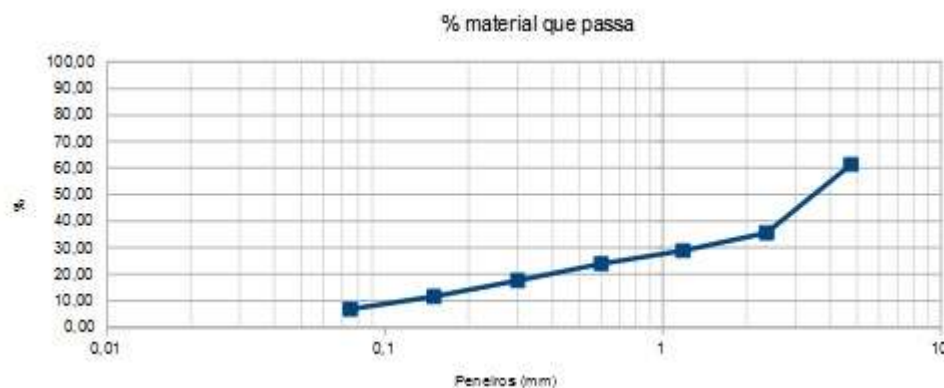
Anexo 3 – Resultados detalhados dos ensaios químicos e mineralógicos em laboratório.



Curva granulométrica amostra RC 1.



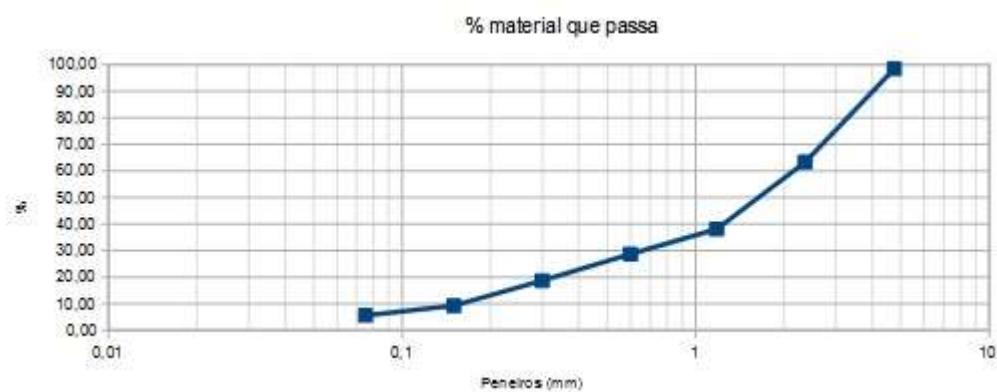
Curva granulométrica amostra SC 2.



Curva granulométrica amostra RDA 4.



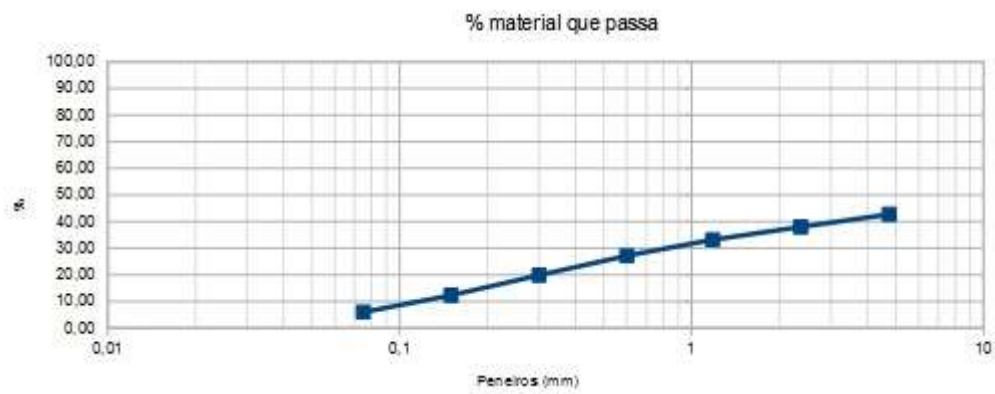
Curva granulométrica amostra RTL 5.



Curva granulométrica amostra ROK 6.



Curva granulométrica amostra RNI 7/1.



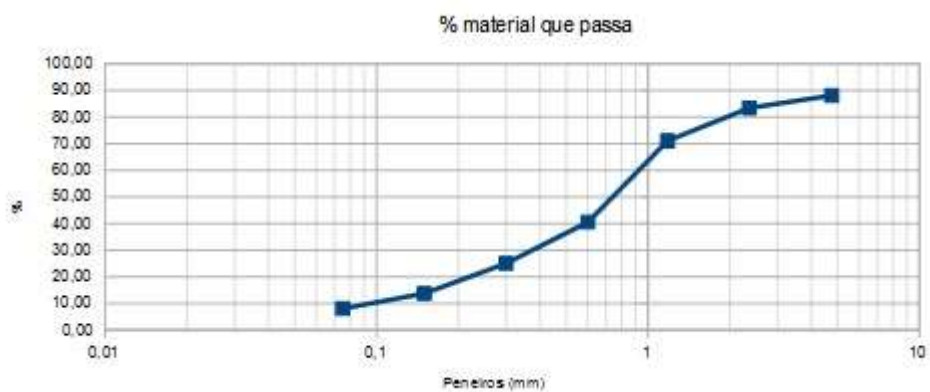
Curva granulométrica amostra RNI 7/2.



Curva granulométrica amostra RT 8.



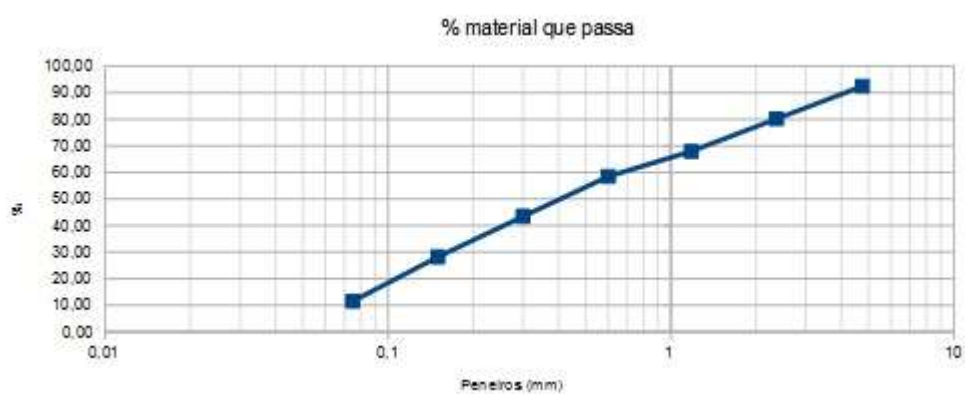
Curva granulométrica amostra CBRC 11.



Curva granulométrica amostra CBRC 12.



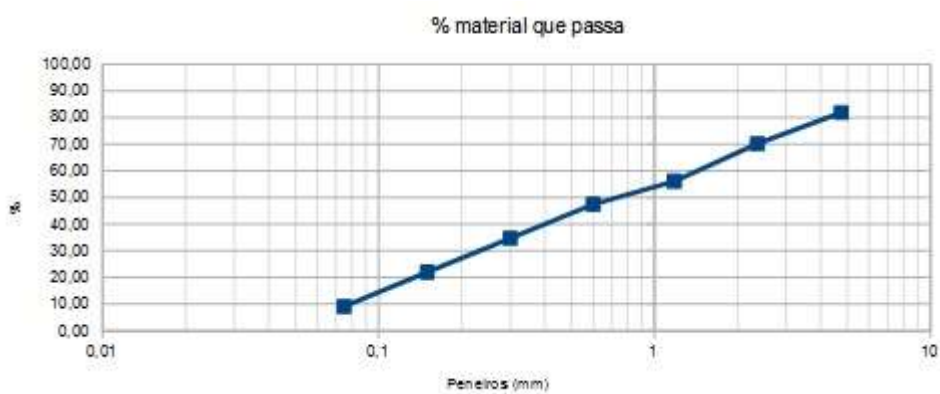
Curva granulométrica amostra BDA 3.



Curva granulométrica amostra BB 9



Curva granulométrica amostra BB 13



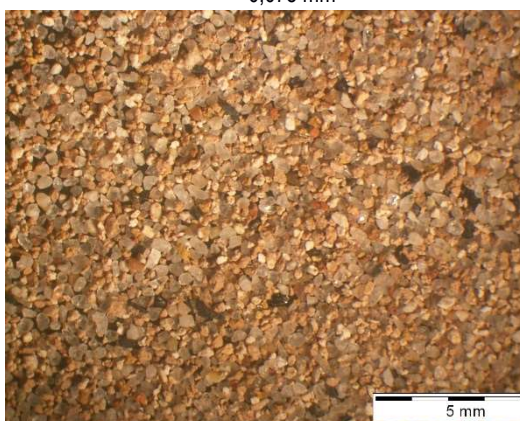
Curva granulométrica amostra BB 14



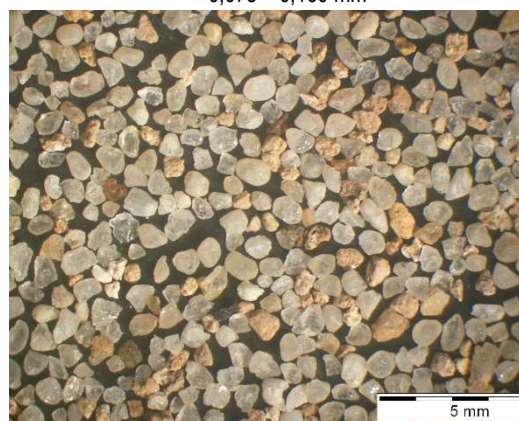
< 0,075 mm



0,075 – 0,160 mm



0,160 – 0,315 mm



0,315 – 0,630 mm



0,630 – 1,25 mm



1,25 – 2,50 mm



2,50 – 5,0 mm



Fração >5.0 mm

Aspetto da areia da argamassa RC 1.



< 0,075 mm



0,075 – 0,160 mm



0,160 – 0,315 mm



0,315 – 0,630 mm



0,630 – 1,25 mm



1,25 – 2,50 mm

Aspeto da areia da argamassa SC 2.



< 0,075 mm



0,075 – 0,160 mm



0,160 – 0,315 mm



0,315 – 0,630 mm



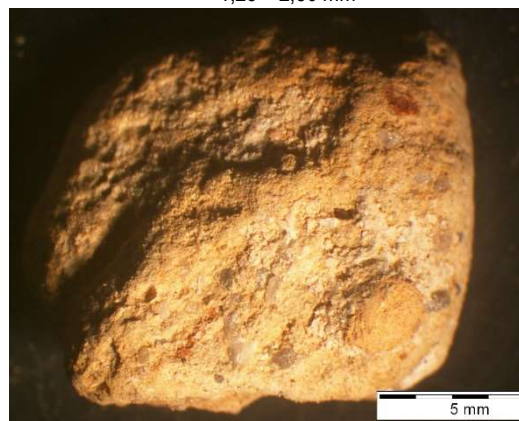
0,630 – 1,25 mm



1,25 – 2,50 mm



2,50 – 5,0 mm



Fração >5.0 mm

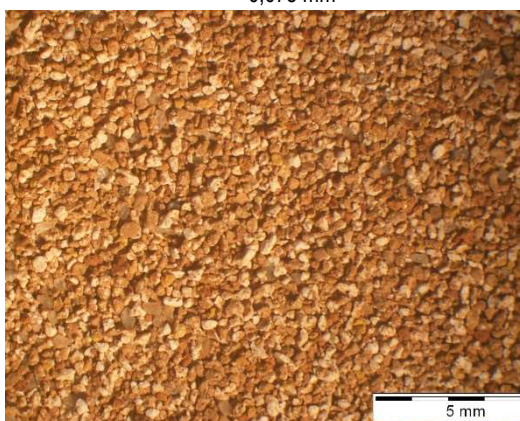
Aspetto da areia da argamassa BDA 3.



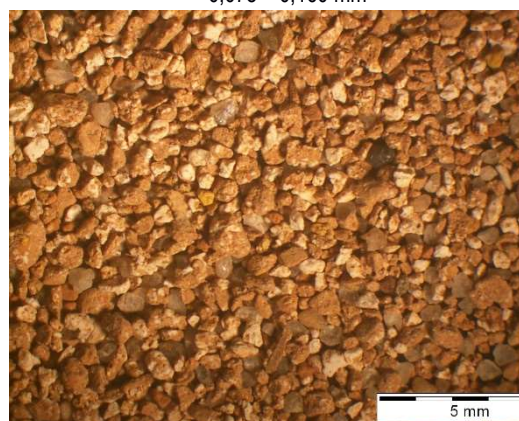
< 0,075 mm



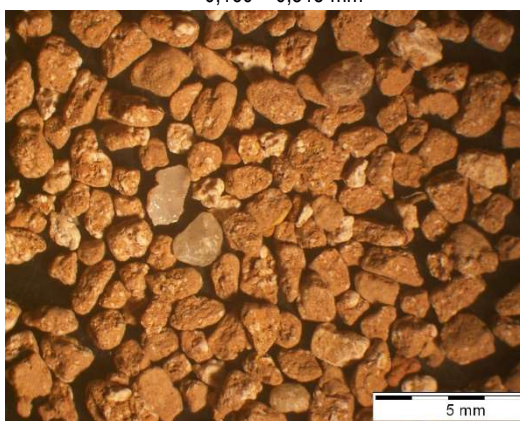
0,075 – 0,160 mm



0,160 – 0,315 mm



0,315 – 0,630 mm



0,630 – 1,25 mm



1,25 – 2,50 mm

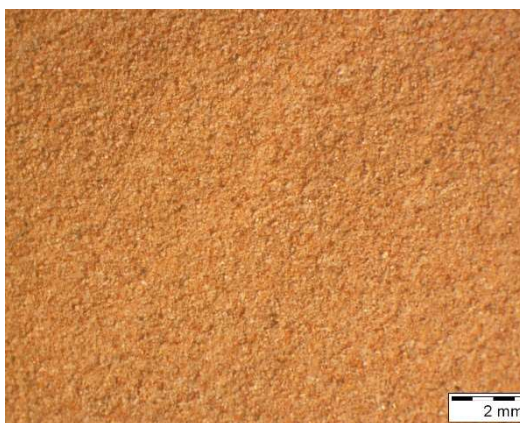


2,50 – 5,0 mm



Fração >5.0 mm

Aspeto da areia da argamassa RDA 4.



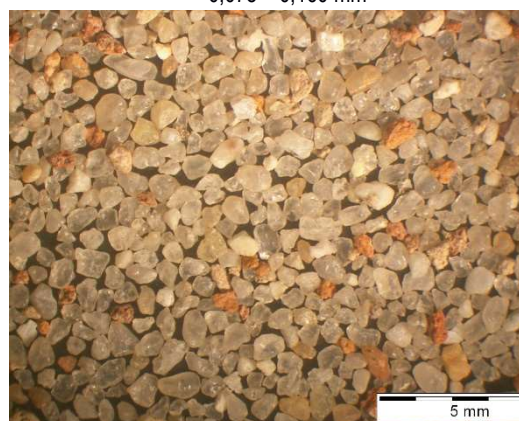
< 0,075 mm



0,075 – 0,160 mm



0,160 – 0,315 mm



0,315 – 0,630 mm



0,630 – 1,25 mm



1,25 – 2,50 mm



2,50 – 5,0 mm



Fração >5.0 mm

Aspetto da areia da argamassa RTL 5.



< 0,075 mm



0,075 – 0,160 mm



0,160 – 0,315 mm



0,315 – 0,630 mm



0,630 – 1,25 mm



1,25 – 2,50 mm



2,50 – 5,0 mm



Fração >5.0 mm

Aspetto da areia da argamassa ROK 6.



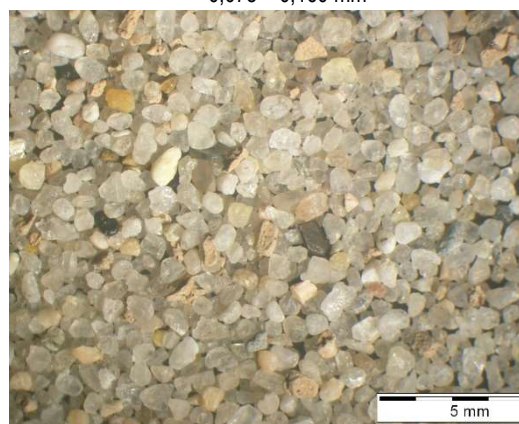
< 0,075 mm



0,075 – 0,160 mm



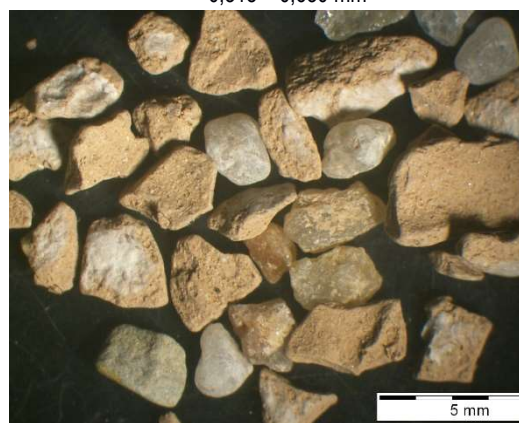
0,160 – 0,315 mm



0,315 – 0,630 mm



0,630 – 1,25 mm



1,25 – 2,50 mm

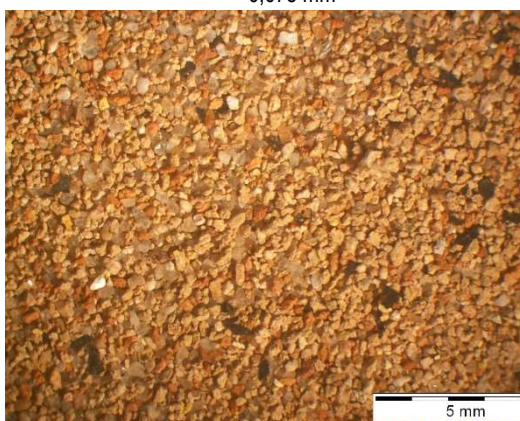
Aspeto da areia da argamassa RNI 7.1.



< 0,075 mm



0,075 – 0,160 mm



0,160 – 0,315 mm



0,315 – 0,630 mm



0,630 – 1,25 mm



1,25 – 2,50 mm

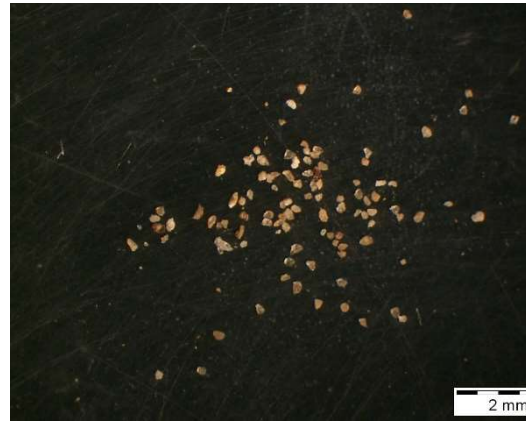


2,50 – 5,0 mm



Fração >5.0 mm

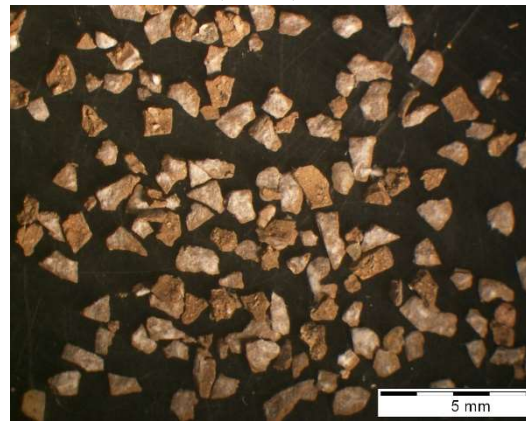
Aspeto da areia da argamassa RNI 7.2.



0,075 – 0,160 mm



0,160 – 0,315 mm



0,315 – 0,630 mm



0,630 – 1,25 mm

Aspeto da areia da argamassa RT 8.



< 0,075 mm



0,075 – 0,160 mm



0,160 – 0,315 mm



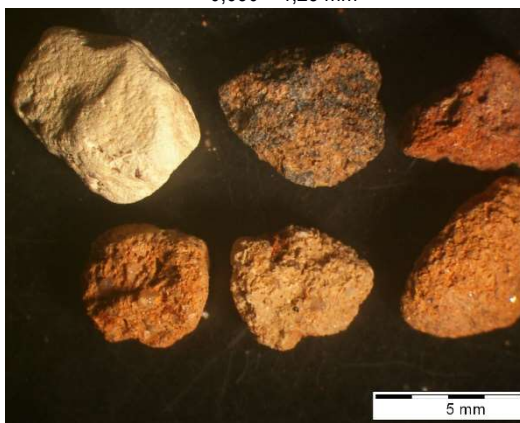
0,315 – 0,630 mm



0,630 – 1,25 mm



1,25 – 2,50 mm



2,50 – 5,0 mm



Fração >5.0 mm

Aspeto da areia da argamassa BB 9.



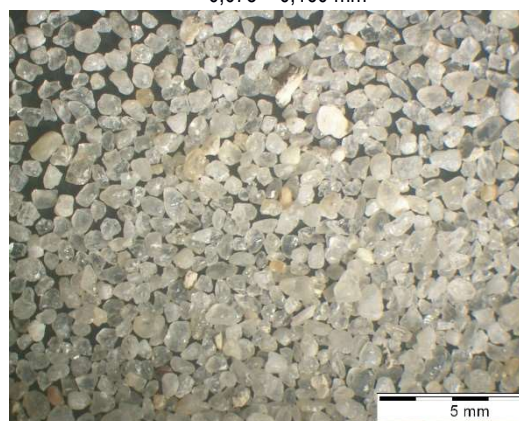
< 0,075 mm



0,075 – 0,160 mm



0,160 – 0,315 mm



0,315 – 0,630 mm



0,630 – 1,25 mm



1,25 – 2,50 mm

Aspeto da areia da argamassa CBRC 11.



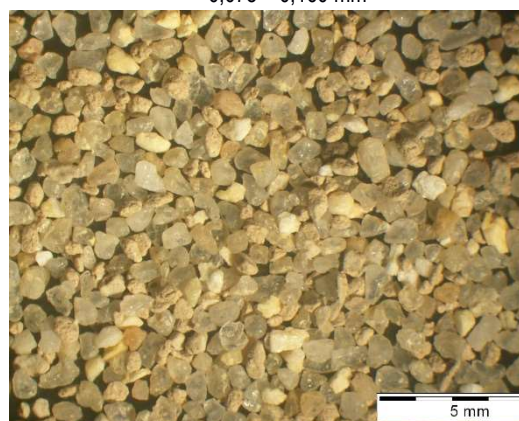
< 0,075 mm



0,075 – 0,160 mm



0,160 – 0,315 mm



0,315 – 0,630 mm



0,630 – 1,25 mm



1,25 – 2,50 mm



2,50 – 5,0 mm



Fração >5.0 mm

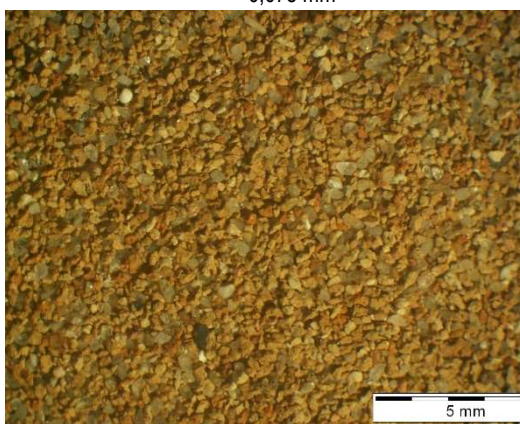
Aspetto da areia da argamassa CBRC 12.



< 0,075 mm



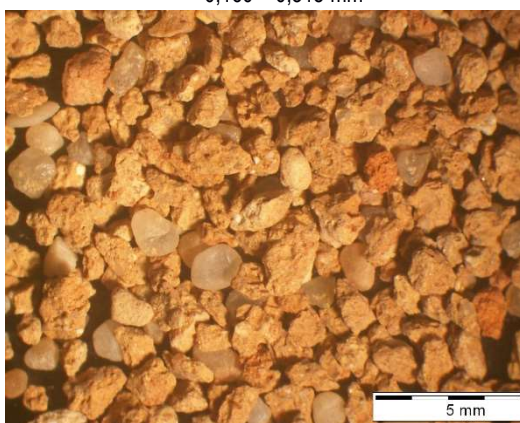
0,075 – 0,160 mm



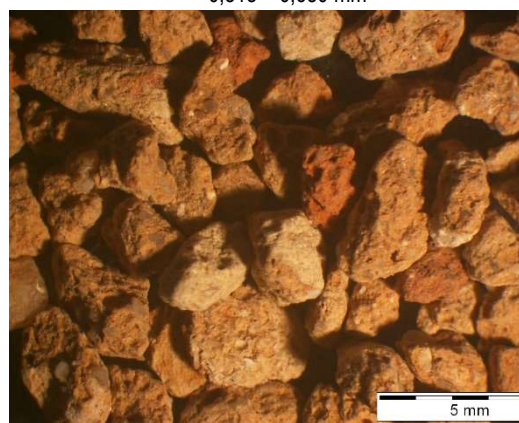
0,160 – 0,315 mm



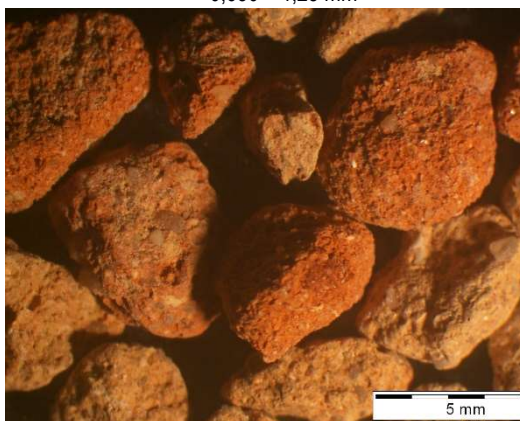
0,315 – 0,630 mm



0,630 – 1,25 mm



1,25 – 2,50 mm

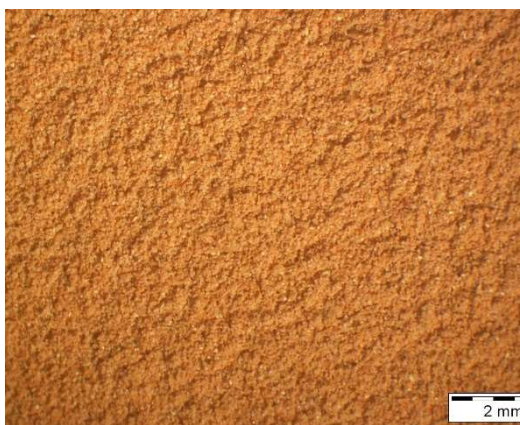


2,50 – 5,0 mm



Fração >5.0 mm

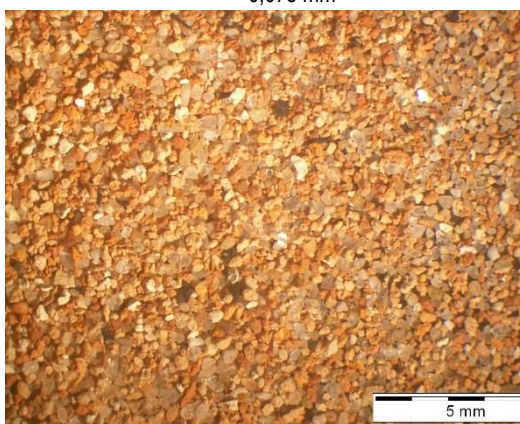
Aspetto da areia da argamassa BB 13.



< 0,075 mm



0,075 – 0,160 mm



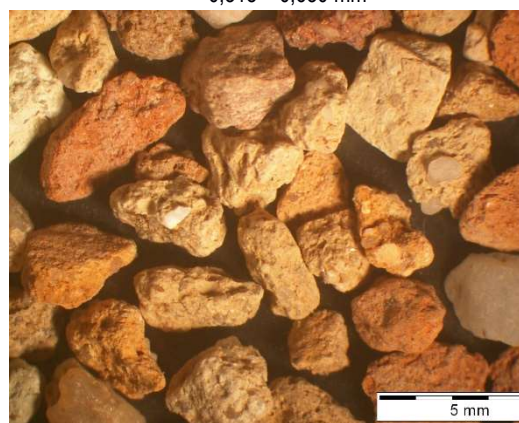
0,160 – 0,315 mm



0,315 – 0,630 mm



0,630 – 1,25 mm



1,25 – 2,50 mm

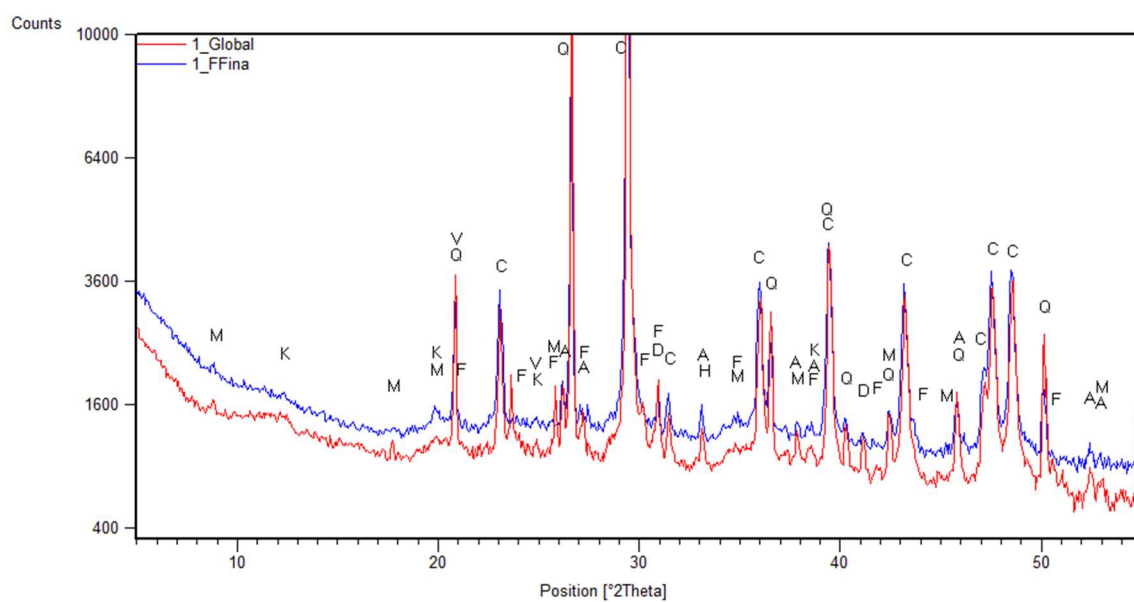


2,50 – 5,0 mm



Fração >5.0 mm

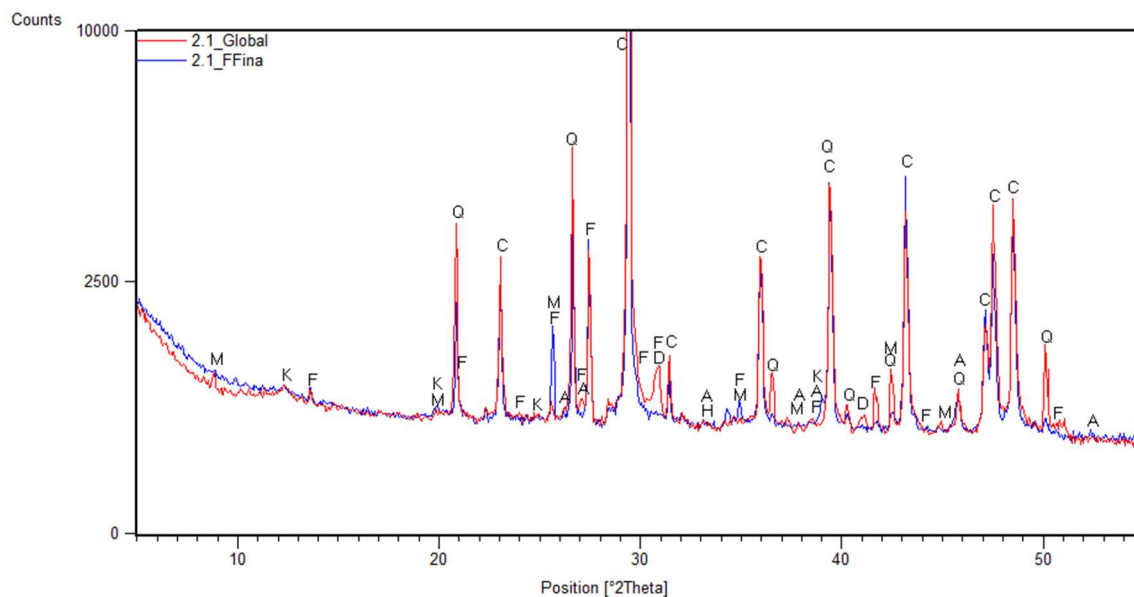
Aspetto da areia da argamassa BB 14.



(Global – vermelho; FFina – azul).

Notação utilizada: M – Mica; K – Caulinite; Q – Quartzo; V – Vaterite; F – Feldspato; C – Calcite; A – Aragonite;
 –
 D – Dolomite; H - Hematite

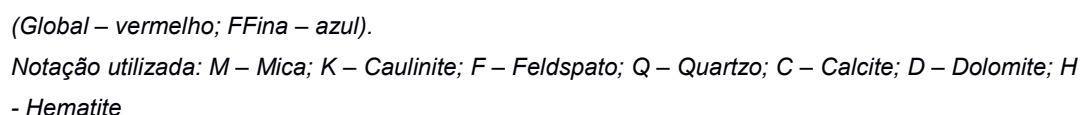
Registos DRX da argamassa RC 1.



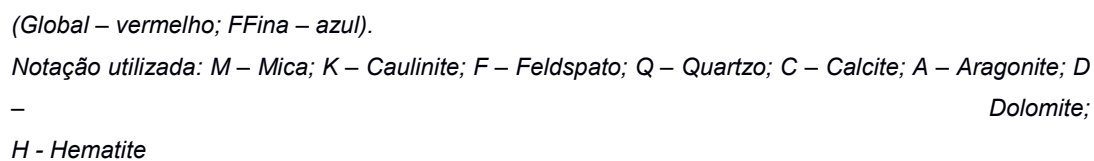
(Global – vermelho; FFina – azul).

Notação utilizada: M – Mica; K – Caulinite; F – Feldspato; Q – Quartzo; C – Calcite; A – Aragonite;
 D – Dolomite;
 H - Hematite

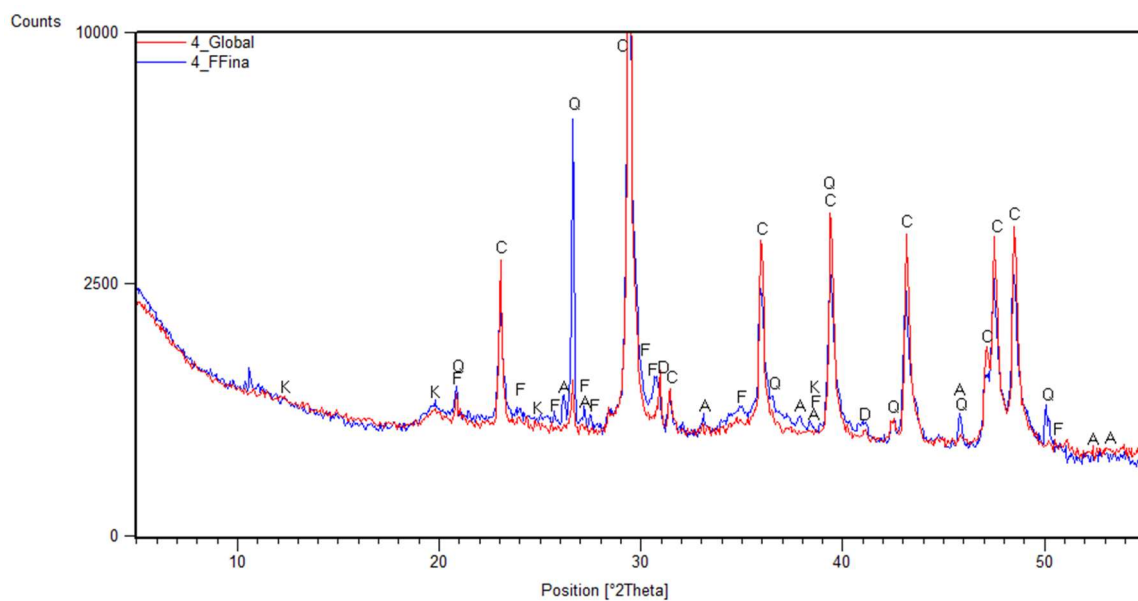
Registos DRX da argamassa RC 2.



Registos DRX da argamassa SC 2.



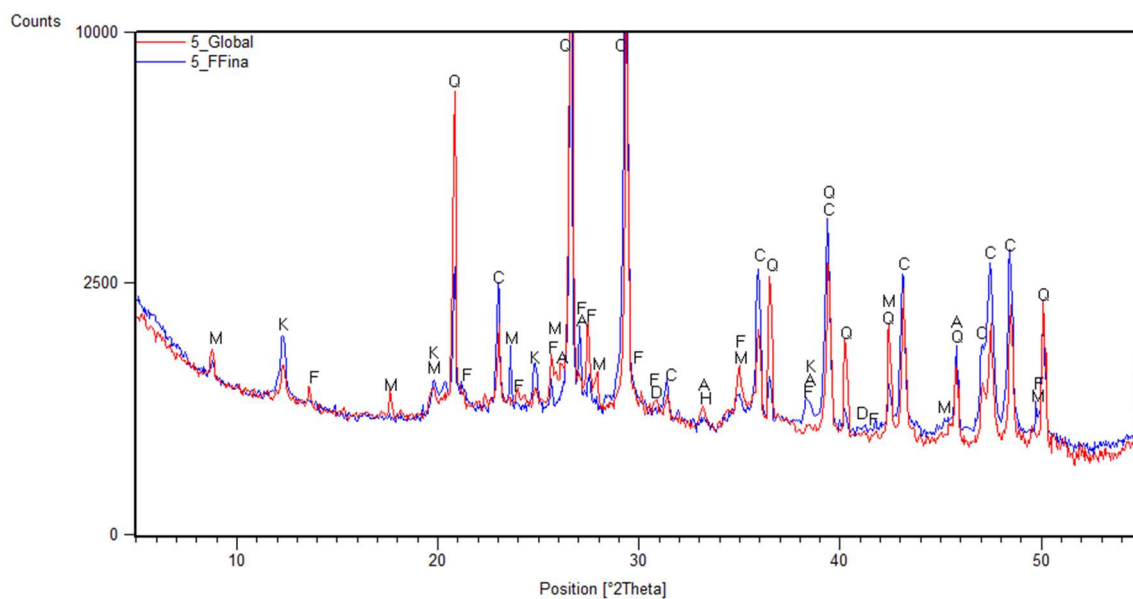
Registos DRX da argamassa BDA 3



(Global – vermelho; FFina – azul).

Notação utilizada: K – Caulinite; F – Feldspato; Q – Quartzo; C – Calcite; A – Aragonite; D – Dolomite

Registos DRX da argamassa RDA 4.

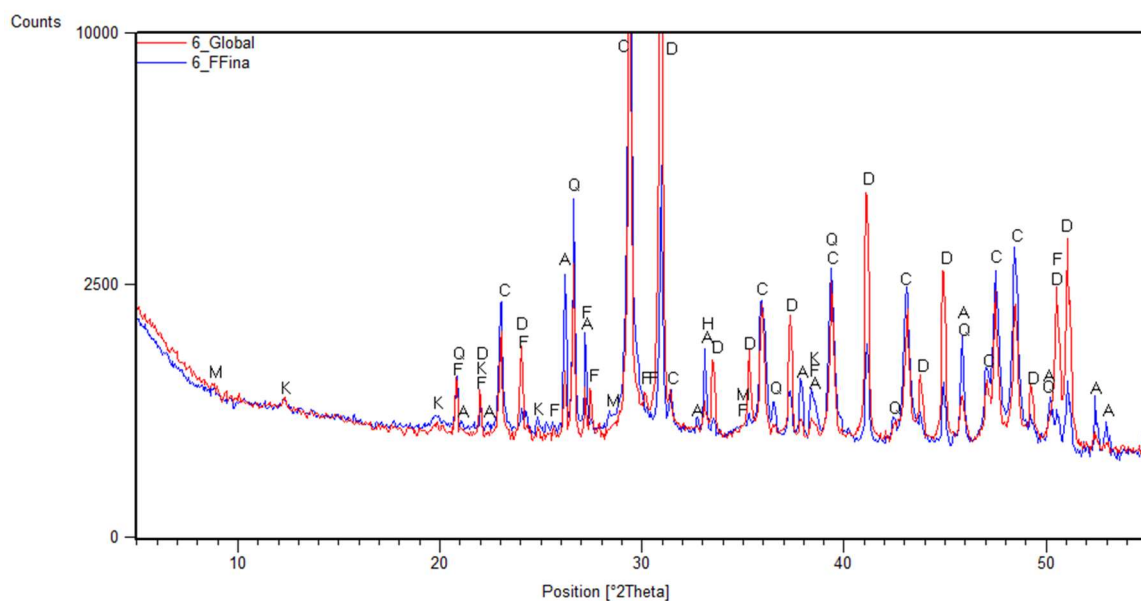


(Global – vermelho; FFina – azul).

Notação utilizada: M – Mica; K – Caulinite; F – Feldspato; Q – Quartzo; C – Calcite; A – Aragonite; D – Dolomite;

H – Hematite

Registos DRX da argamassa RTL 5.

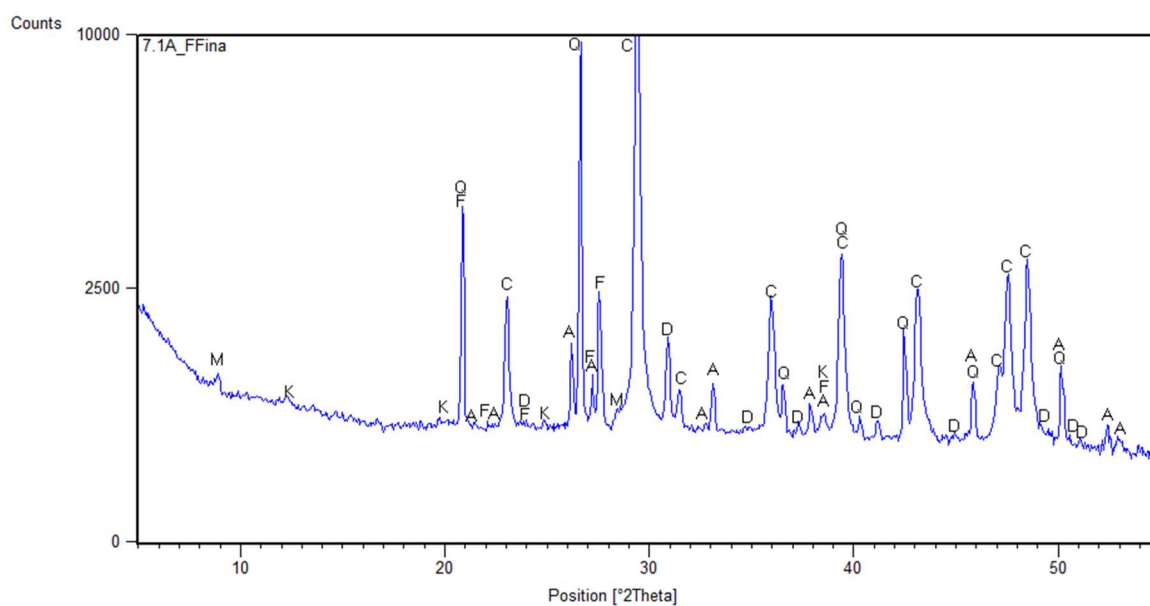


(Global – vermelho; FFina – azul).

Notação utilizada: M – Mica; K – Caulinite; F – Feldspato; Q – Quartzo; C – Calcite; A – Aragonite; D – Dolomite;

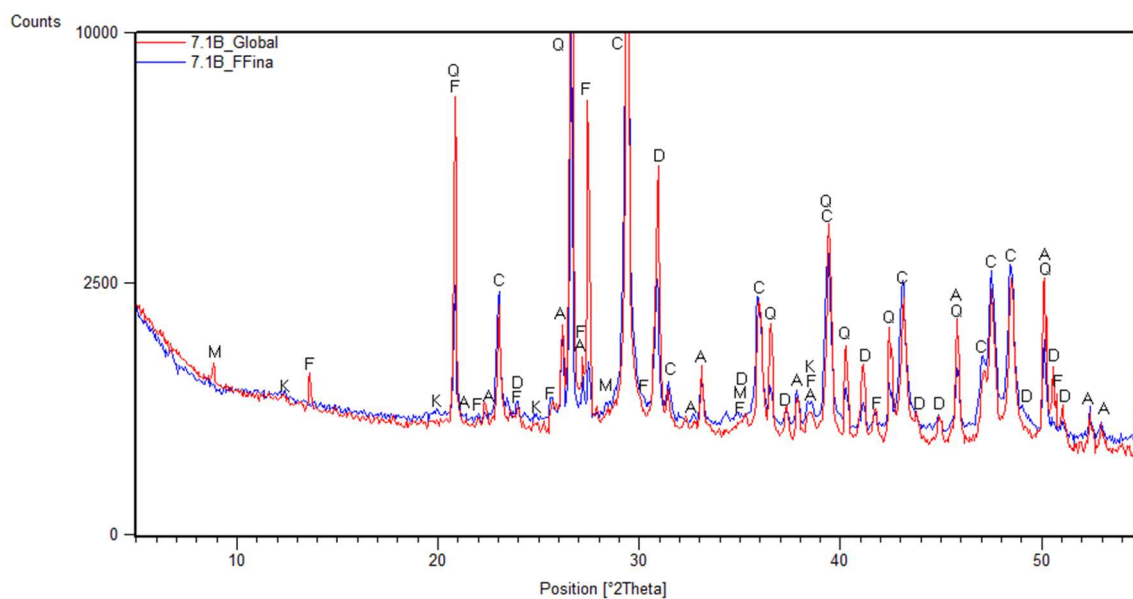
H - Hematite

Registos DRX da argamassa ROK 6.



Notação utilizada: M – Mica; K – Caulinite; F – Feldspato; Q – Quartzo; C – Calcite; A – Aragonite; D – Dolomite

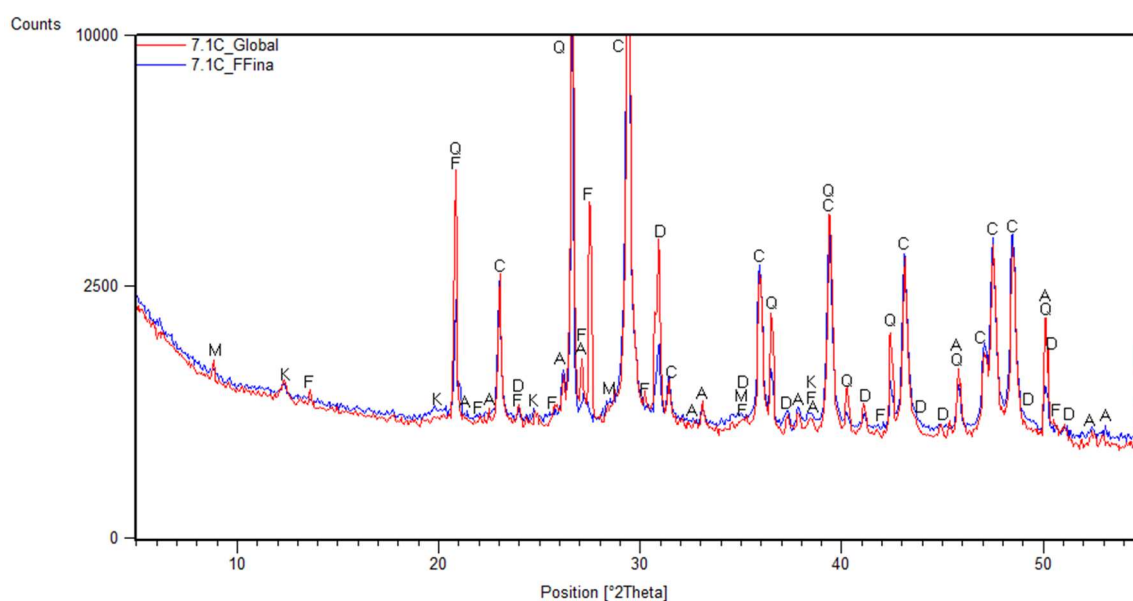
Registos DRX da argamassa RNI 7.1A



(Global – vermelho; FFina – azul).

Notação utilizada: M – Mica; K – Caulinite; F – Feldspato; Q – Quartzo; C – Calcite; A – Aragonite; D – Dolomite

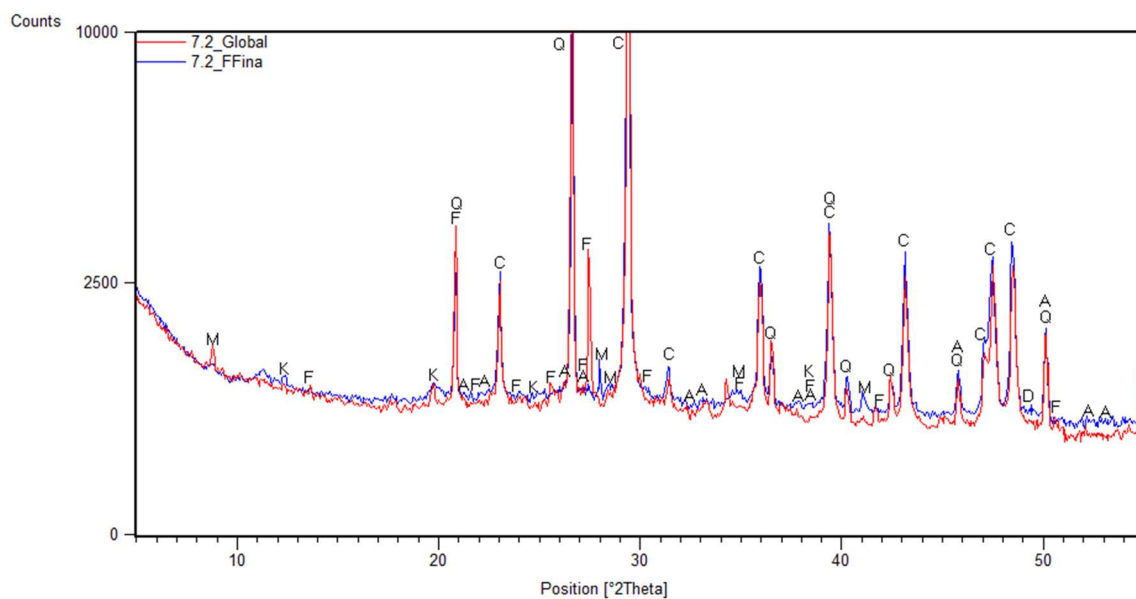
Registos DRX da argamassa RNI 7.1B



(Global – vermelho; FFina – azul).

Notação utilizada: M – Mica; K – Caulinite; F – Feldspato; Q – Quartzo; C – Calcite; A – Aragonite; D – Dolomite

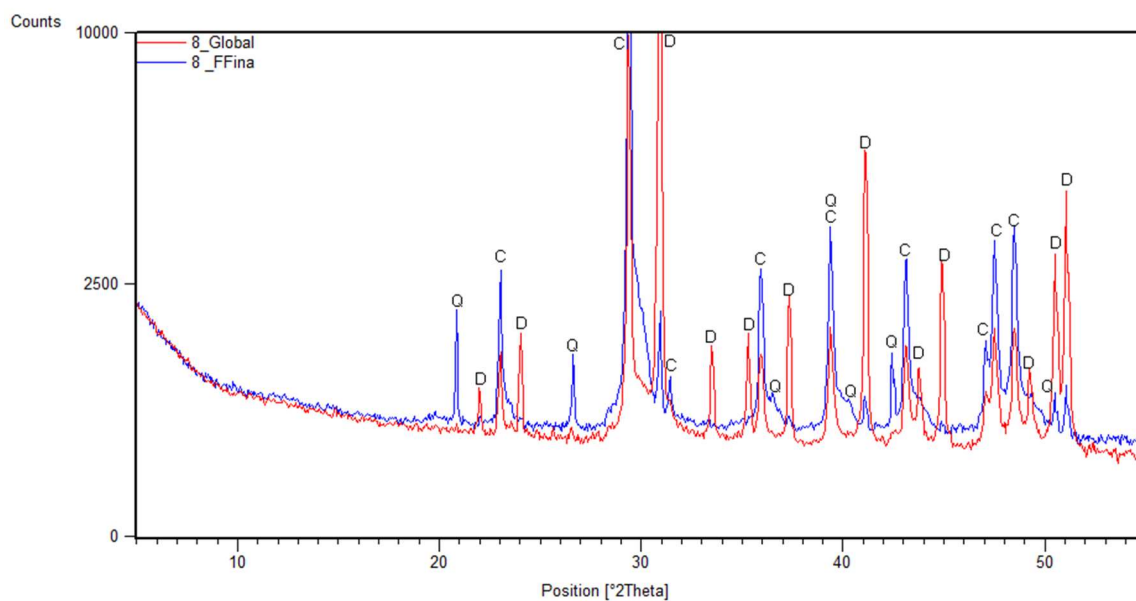
Registos DRX da argamassa RNI 7.1C



(Global – vermelho; FFina – azul).

Notação utilizada: M – Mica; K – Caulinite; F – Feldspato; Q – Quartz; C – Calcite; A – Aragonite

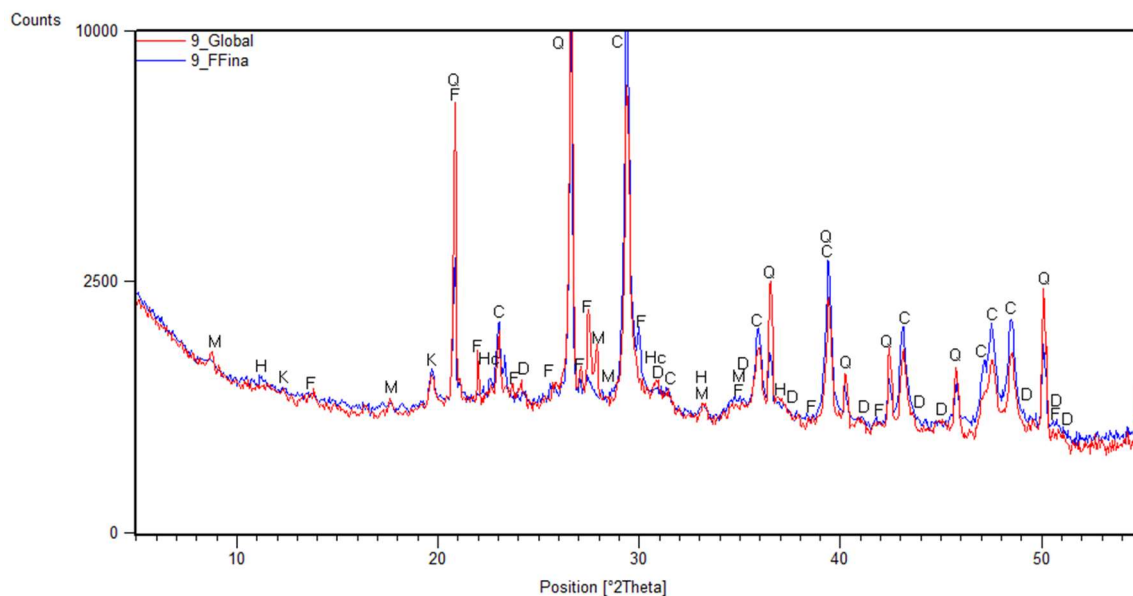
Registos DRX da argamassa RNI 7.2.



(Global – vermelho; FFina – azul).

Notação utilizada: Q – Quartz; C – Calcite; D – Dolomite

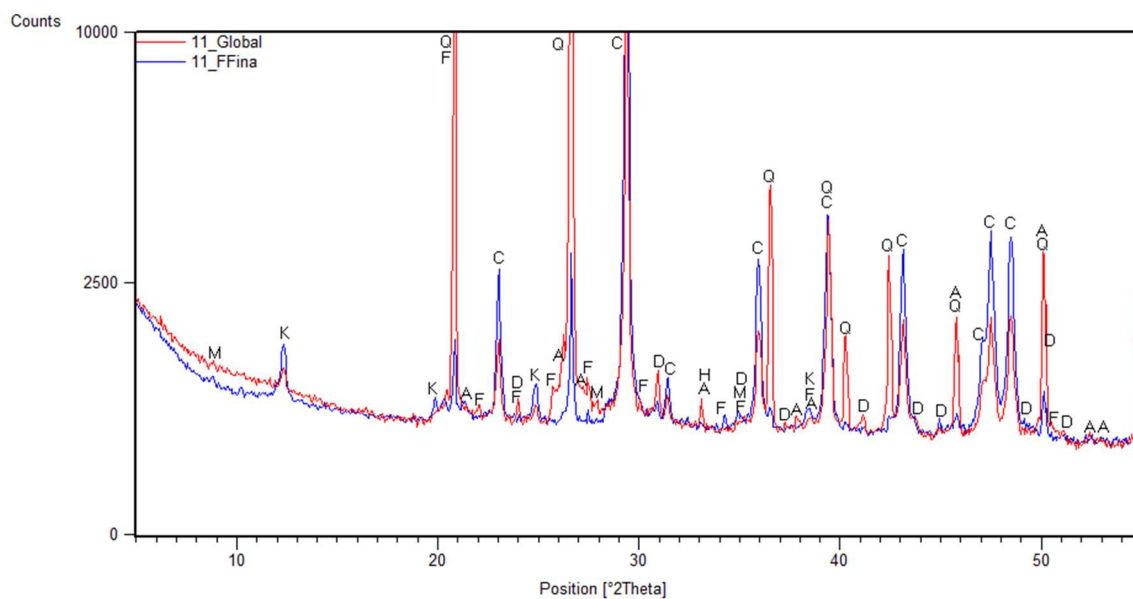
Registos DRX da argamassa RT 8.



(Global – vermelho; FFina – azul).

Notação utilizada: M – Mica; Hc – Hidrocalumite; K – Caulinite; F – Feldspato; Q – Quartzo; C – Calcite; D – Dolomite; H – Hematite

Registos DRX da argamassa BB 9.



(Global – vermelho; FFina – azul).

Notação utilizada: M – Mica; K – Caulinite; F – Feldspato; Q – Quartzo; C – Calcite; D – Dolomite; A – Aragonite; H – Hematite

Registos DRX da argamassa CBRC 11.



Notação utilizada: M – Mica; K – Caulinite; F – Feldspato; Q – Quartzo; C – Calcite; D – Dolomite; H – Hematite

136

